



DIPLOMARBEIT

Messtechnische Konzepterstellung für einen innovativen transkritischen CO₂-Prozess

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

im Rahmen des Studiums

Physikalische Energie- und Messtechnik

eingereicht von

Gilbert Zisser, BSc

Matrikelnummer: 01606413

ausgeführt am Institut für Angewandte Physik (IAP)
der Fakultät für Physik der Technischen Universität Wien
in Zusammenarbeit mit der Wien Energie GmbH (WE)

unter der Betreuung durch
Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Martin **Gröschl** (IAP)
Dipl.-Ing. Stefan **Buchner** (WE)

Wien, 08.03.2024

Verfasser/in

Betreuer/in (IAP)

Danksagung

Ich möchte mich herzlich bei allen bedanken, die dazu beigetragen haben, dass diese Masterarbeit erfolgreich abgeschlossen werden konnte.

Ganz besonders gilt mein Dank zu Beginn meinem Betreuer an der Technischen Universität Wien, Professor Martin Gröschl. Er hat mich sowohl administrativ als auch inhaltlich während des gesamten Prozesses unterstützt und mir das notwendige Vertrauen entgegengebracht, um die Arbeit zu dem zu machen, was sie jetzt ist. Der ehrliche und offene Austausch war für diese Arbeit von unschätzbarem Wert.

Ein besonderer Dank geht an die Wien Energie GmbH, insbesondere an meine Führungspersonen Georg Geißegger und Leila Teymournia, die mir diese Arbeit erst ermöglicht haben. Vielen Dank für die Unterstützung und Hilfe bei diesem nächsten Schritt meiner akademischen Laufbahn, die zeitlichen Ressourcen, die ihr mir zur Verfügung gestellt habt, sowie das Vertrauen in mich und meine Arbeit.

Ebenso möchte ich meinem geschätzten Kollegen und Betreuer von Seiten der Wien Energie, Stefan Buchner, danken. Danke für die zahlreichen Gespräche und Diskussionen, die meinem inhaltlichen Wissen und meiner Motivation sehr zugutegekommen sind. Es war eine spannende und zugleich amüsante Zusammenarbeit.

Zudem möchte ich mich auch bei allen Projektpartnern des Forschungsprojektes SETE 2 bedanken, die an diesem Forschungsvorhaben einen großen Anteil haben.

Abschließend danke ich ganz besonders meiner Freundin Julia und meiner Familie. Sie haben nicht nur Geduld und Verständnis für meine oftmalig intensive Hingabe an dieser Arbeit aufgebracht, sondern auch die Zeit und Mühe investiert, um meine Arbeit Korrektur zu lesen und zu verbessern. Eure Unterstützung und der ständige Austausch mit euch war eine große Hilfe.

Kurzfassung

Der innovative, jedoch momentan noch rein theoretische SETE-Prozess (Solare elektrische und thermische Energiebereitstellung - ein transkritischer CO₂-Prozess) könnte in der zukünftigen Energieversorgung Wiens eine wesentliche Rolle spielen. Als Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungs-Prozess ist die gleichzeitige Bereitstellung von Wärme, Kälte und Strom möglich. Ein zentraler Schritt in der Entwicklung dieses Prozesses ist die Konzeptionierung eines Prototyps. Ziel dieser Masterarbeit ist die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit der notwendigen Messtechnik und die damit verbundene Entwicklung eines Messkonzeptes für diesen Prototyp. Die Identifikation und Beschreibung voraussichtlicher Prozess- und Messgrößen sowie die Positionierung und Auswahl notwendiger Messsysteme sind dafür notwendige Schritte.

Basierend auf den wichtigsten physikalischen Grundlagen zu thermodynamischen Kreisprozessen sowie der Entstehungshistorie des SETE-Prozesses in Kapitel 2 werden in Kapitel 3 relevante messtechnische Themen sowie mögliche Messverfahren mitsamt deren Funktion sowie Vor- und Nachteilen erläutert. Der Aufbau und die für die Aufstellung des Messkonzeptes notwendigen Betriebszustände des Prozesses werden in Kapitel 4 analysiert. Die genaue Identifikation, Beschreibung und Festlegung der Messstellen und deren Anforderungen sowie die darauf aufbauende Auswahl und Analyse der Messsysteme erfolgt in Kapitel 5. Der zusammenfassende Messkonzeptvorschlag, siehe Kapitel 6, kann als Grundlage für die daran ansetzende weitere Erforschung des SETE-Prozesses durch die Aufstellung eines Regelungskonzeptes und den Bau eines Prototyps dienen.

Abstract

The innovative, yet currently theoretical, SETE-process (a transcritical CO₂-process) could play a significant role in the future energy supply in Vienna. The SETE-process allows the simultaneous provision of heat, cooling and electricity. An important step in the development of this new thermodynamic process is the conceptualization of a prototype. The aim of this master's thesis is the scientific examination of the necessary measuring devices and the associated development of a measurement concept for this prototype. The identification and description of expected process and measurement variables as well as the positioning and selection of necessary measurement systems are required steps to look at.

Based on the most important physical fundamentals of thermodynamic circular processes and the history of the SETE-process in Chapter 2, Chapter 3 explains relevant metrological topics and possible measurement methods, including their function, advantages and disadvantages. The structure and the operating states of the process required to set up the measurement concept are analyzed in Chapter 4. The precise identification, description and definition of the measuring points and their requirements, as well as the selection and analysis of the measuring systems, is carried out in Chapter 5. The summarized measurement concept proposal, see Chapter 6, can serve as the basis for further research into the SETE-process by drawing up a control concept and building a prototype.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation	2
1.2	Wissenschaftliche Zielsetzung und Methodik	2
2	Grundlagen zum technischen Prozess	4
2.1	Allgemeine Grundlagen zu thermodynamischen Kreisprozessen	4
2.1.1	Der Kältekreislauf	4
2.1.2	Subkritischer Kreisprozess	5
2.1.3	Transkritischer Kreisprozess	5
2.1.4	Thermodynamik oberhalb des Kritischen Punktes	6
2.1.5	Kältemittel	7
2.2	Der SETE-Prozess	9
2.2.1	SETE - Patentprozess	10
2.2.2	SETE - Modifizierung des Prozesses und erste Simulationen	13
3	Grundlagen zur Mess- und Regelungstechnik	17
3.1	Messtechnik	17
3.1.1	Messsysteme	17
3.1.2	Messmethode	18
3.1.3	Messort	19
3.1.4	Messbereich	20
3.1.5	Messsignale - Klassifizierung	20
3.1.6	Messabweichungen	21
3.1.7	Automatisierungspyramide - Feldebene	23
3.2	Sensorik	24
3.2.1	Temperaturmessung	24
3.2.2	Druckmessung	30
3.2.3	Durchflussmessung	35
3.2.4	Füllstandsmessung	40
3.2.5	Prinzip der Wärme- und Kältemengenzählung	41
3.3	Regelungstechnik	42
3.3.1	Stell- und Regelgröße	43
4	Aufbau und Betriebszustände des Prozesses	44
4.1	Finaler Aufbau und Funktionsbeschreibung	44
4.2	Betriebsmodi	46
4.2.1	Betriebsmodus 1: EXP aktiv & EJE inaktiv & BYP inaktiv	47
4.2.2	Betriebsmodus 2: EXP inaktiv & EJE aktiv & BYP inaktiv	48
4.2.3	Betriebsmodus 3: EXP aktiv & EJE aktiv & BYP inaktiv	49
4.2.4	Betriebsmodus 4: EXP inaktiv & EJE inaktiv & BYP aktiv	50

5	Erstellung des Messkonzepts	51
5.1	Regel- und Stellgrößen verwandter Prozesse	51
5.2	Betrachtung Messstellen und messtechnische Anforderungen	53
5.2.1	Prozesspunkte	53
5.2.2	Messstellen und Anforderungen der Durchflussmessung	55
5.2.3	Messstellen und Anforderungen der Temperatur- und Druckmessung	61
5.2.4	Messstellen und Anforderungen der Füllstandsmessung	70
5.3	Auswahl der Messverfahren und Sensorik	71
5.3.1	Sensorik der Durchflussmessung	71
5.3.2	Sensorik der Temperaturmessung	81
5.3.3	Sensorik der Druckmessung	84
5.3.4	Sensorik der Füllstandsmessung	87
5.4	Energiebilanz	89
5.4.1	Energiemengenzählung in den Sekundärkreisläufen	90
5.4.2	Strommengenzählung und Stromverbraucher	92
6	Zusammenfassender Messkonzeptvorschlag	94
	Abbildungsverzeichnis	98
	Tabellenverzeichnis	100
	Literaturverzeichnis	102

Nomenklatur

Physikalische Symbole

α	materialabhängiger Koeffizient	
β	materialabhängiger Koeffizient	
\dot{m}	Massendurchfluss	kg s^{-1}
\dot{Q}	Wärme-/Kälteleistung	W
\dot{V}	Volumendurchfluss	m^3h^{-1}
ϵ	Oberflächendehnung	1
η	Wirkungsgrad	1
ν	Viskosität	m^2s^{-1}
ω	Winkelgeschwindigkeit	s^{-1}
Φ	(Massenstrom-)verhältnis	1
ρ	spezifischer Widerstand / Dichte	
σ	elektrische Leitfähigkeit	Sm^{-1}
c	Schallgeschwindigkeit	m s^{-1}
c_w	spezifische Wärmekapazität	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
d	Durchmesser	m
d	Störgröße	
e	Differenz	
F	Kraft	N
l	Länge	m
M	Machzahl	1
m	Masse	kg
P	elektrische Leistung	W
p	Druck	bar
Q	Wärmemenge	J
R	elektrischer Widerstand	Ω
Re	Reynoldsche Zahl	
S	Seebeck-Koeffizient	V K^{-1}
T	Temperatur	$^{\circ}\text{C}$
t	Zeit	s

U	Spannung	V
u	Messgröße oder Stellgröße	
v	Geschwindigkeit	m s^{-1}
w	Führungsgröße	
x	Messsignal	
y	Messwert	
z	Störgröße	

Indizes tiefgestellt

0	Kälte (-leistung)
1	Punkt 1
1-2	Differenz zwischen Punkt 1 und 2
2	Punkt 2
3	Punkt 3
A	Punkt A
abs	absolut
aus	Ausgang
B	Punkt B
C	Kondensator
c	Coriolis
cycle	Kreis
DM	erzeugte elektrische Leistung
e	Über (-druck)
GK	Gaskühler
H	Antrieb (-leistung)
h	Überhitzung
i	innen
k	Unterkühlung
M	gemessen
m	Massenstrom
max	maximal
min	minimal
n	normiert
norm	normaler Betrieb
O	Arbeit(-sdruck)

p	druckabhängig
PU	Pumpe
r	real
ref	Referenz
rel	relativ
RL	Rücklauf
S	Höchst (-druck)
s	Ausgang oder Sättigung
sm	Saugmassenstrom
T	Thermo / Prüf (-druck)
tm	Treibmassenstrom
VD	Verdampfer
VL	Vorlauf
W	wahr
Abkürzungen	
BYP	Bypassstrecke
C	Kondensator
DMS	Dehnmessstreifen
DV	Drosselventil
EJE	Ejektor
ET	Energieanalysator
EXP	Expander
FCKW	Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe
FT	Durchflussmessgerät
GK	Gaskühler
GWP	Global Warming Potential
H	elektrisches Heizelement
HP	Hauptpumpe
KOM	Kompressor
KP	kritischer Punkt
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKK	Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung
LI	Füllstandsmessgerät
MID	magnetisch-induktive Durchflussmesser

MS	Mitteldrucksammler
NS	Niederdrucksammler
NTC	Negative Temperature Coefficient
ODP	Ozon Depletion Potential
ORC	Organic Rankine Cycle
P	Pumpe
POCP	Photochemical Ozone Creation Potential
PP	Prozesspunkt
PT	Druckmessgerät
PTC	Positive Temperature Coefficient
RV	motorgesteuertes Regelventil
Sek	Sekundärkreis
SETE	Solare elektrische und thermische Energiebereitstellung
TEWI	Total Equivalent Warming Impact
TT	Temperaturmessgerät
VD	Verdampfer
WT	Wärmetauscher
WT _p	Wärmetauscher primärer Wärmeeintrag

1 Einleitung

Ein wichtiger Baustein der weltweiten Energiegewinnung sind die sogenannten Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen (KWK-Anlagen), mit denen es möglich ist, effizient sowohl Wärme als auch elektrischen Strom in einer einzigen Anlage zu erzeugen. Einen besonderen Mehrwert bringen diese KWK-Anlagen speziell dann, wenn die erzeugte Wärme und der erzeugte Strom direkt vor Ort benötigt und abgenommen werden. Oftmals existiert zusätzlich zum Bedarf dieser beiden Energieformen auch noch der Bedarf an Kälte für anderweitige Prozesse wie die Gebäudekühlung. Eine Möglichkeit diesen zusätzlichen Bedarf zu decken ist es, elektrisch betriebene Kompressionskältemaschinen oder thermisch betriebene Absorptionskältemaschinen zusätzlich zur KWK-Anlage aufzustellen. Wird alternativ zu dieser zusätzlichen Maschine, Wärme, Strom und Kälte in Einem erzeugt, wird dies daraus folgernd als Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungs-Anlage (KWKK-Anlage) bezeichnet. Es gibt verschiedene Möglichkeiten diese KWKK-Anlagen zu gestalten, welche alle unterschiedliche Vorteile und Ergebnisse bringen. Von zentraler Bedeutung ist jedoch die gute Ausnutzung vorhandener Energiesysteme durch Nutzung von Abwärme und die damit verbundene Primärenergieeinsparung [1].

Die Bedeutung von KWKK-Anlagen als effiziente Energiegewinnungssysteme hat in den letzten Jahren stetig zugenommen, insbesondere vor dem Hintergrund der globalen Bemühungen zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen und der nachhaltigen Energienutzung. Auch in Wien hat man sich weitreichende Ziele gesetzt, um eine erfolgreiche Energiewende durchzuführen. Die Wiener Regierungskoalition (ab November 2020) hat konkret das ambitionierte Ziel ausgerufen, Wien bis 2040 klimaneutral zu machen [2]. Die Wien Energie GmbH als der größte Energieversorger Österreichs trägt hier mit ihren Bemühungen einen großen Teil dazu bei. So investiert die Wien Energie auch in die Forschung und Entwicklung neuer Technologien die, zukünftig zur Dekarbonisierung der Stadt beitragen sollen. Der SETE-Prozess, der in Kapitel 2.2 beschrieben wird, ist ein innovativer, bisher nur theoretischer KWKK-Prozess, der fertig entwickelt in der Wiener Energieversorgung zum Einsatz kommen könnte.

Die Messtechnik ist ein essenzieller Bestandteil aller technischen Prozesse und spielt auch in der Forschung eine große Rolle. So nimmt die Mess- und Sensortechnologie auch eine entscheidende Rolle bei der Steuerung, Überwachung und Optimierung von KWKK-Anlagen ein, da präzise und zuverlässige Daten für eine effiziente Betriebsführung und die kontinuierliche Verbesserung des Systems unerlässlich sind. Speziell in der Phase der Entwicklung sind Messdaten essenziell, um die Zustände neuartiger Prozesse sowie deren Vor- und Nachteile, zu analysieren und verstehen zu können. Die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit der zukünftigen Messtechnik und Sensorik des SETE-Prozesses ist die Grundlage für die Entwicklung eines innovativen Prototyps und dessen späteren Betrieb. Dieser Prototyp soll nicht nur die Machbarkeit des Konzepts demonstrieren, sondern auch als wichtiger Schritt in Richtung einer nachhaltigen Energiegewinnung und höheren Ressourceneffizienz dienen. Die Herausforderungen bei der Entwicklung eines

1 Einleitung

ersten Messkonzeptes für den SETE-Prozess fußen in erster Linie in der Wahl von CO₂ als Kältemittel der KWKK-Anlage, was zu hohen Systemdrücken und herausfordernden thermodynamischen Zustände führt. Diese Arbeit, die sich mit der Entwicklung eines ersten Messkonzeptes und der genannten wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit der notwendigen Messtechnik beschäftigt, trägt dazu bei, die Forschung und Entwicklung im Bereich der KWKK-Technologie, in konkreter Form des SETE-Prozesses, voranzutreiben. Der oftmals theoretische messtechnische Umgang mit transkritischen CO₂-Prozessen wird konkret an einem realen messtechnischen Anwendungsfall erforscht.

1.1 Ausgangssituation

Ein Überblick über die bisherige Entstehungsgeschichte des SETE-Prozesses ist dem Kapitel 2.2 zu entnehmen. Im Februar 2023 wurde parallel zum Start dieser Arbeit, das Forschungsprojekt SETE 2 von der Wien Energie ins Leben gerufen. Dieses Forschungsprojekt, an dem zusätzlich zur Wien Energie sowohl die FH Burgenland als auch die Firma Edtmayer Systemtechnik beteiligt sind, beschäftigt sich mit der Optimierung und Erstellung des genauen Prozesslayouts eines SETE-Prototyps. Dabei werden die finalen Komponenten und Materialien ausgelegt und ausgewählt. Abhängig davon ergeben sich die Betriebszustände (Temperatur- und Druckniveaus) in den einzelnen Punkten des Prozesses. Diese Betriebszustände und das Layout, welche in Kapitel 4 näher beschrieben werden, sind für die Erstellung des Messkonzeptes essenziell. Diese Arbeit ist also in enger Abstimmung und in starker Abhängigkeit von diesem Forschungsprojekt SETE 2 entstanden.

Die fertige Arbeit und das daraus entstandene Messkonzept sollen in Kombination mit dem Ergebnis des Forschungsprojektes SETE 2 als Grundlage für die tatsächliche Realisierung eines ersten SETE-Prototyps dienen.

1.2 Wissenschaftliche Zielsetzung und Methodik

Übergeordnetes Ziel dieser Arbeit ist es, sich detailliert mit dem messtechnischen Konzept für das aktuelle SETE-Prozesslayout auseinander zu setzen, um eine wissenschaftlich fundierte Grundlage für die spätere Aufstellung einer konkreten Regelstrategie und die tatsächliche Umsetzung des Prozesses zu schaffen. Das Messkonzept soll zukünftige Anforderungen des Betriebes der Anlage, speziell im Hinblick auf erste regelungstechnische Überlegungen berücksichtigen. Die Erstellung eines fertigen Regelungskonzeptes ist nicht Teil dieser Arbeit. Aufbauend auf den Vorprojekten, in ständiger Abstimmung mit dem Parallelprojekt SETE 2, sowie im Austausch mit der Wien Energie GmbH bezüglich im Prozess vorkommender Betriebszustände und essenzieller Anlagenkomponenten, sollen primär folgende Aufgabenstellungen bearbeitet werden:

- Identifikation und Beschreibung voraussichtlicher Prozessparameter und in weiterer Folge Messgrößen für den späteren Betrieb. Speziell im Hinblick auf:
 - Messbereich
 - Messverfahren
 - Genauigkeit

1 Einleitung

- Auswahl, Positionierung und Beschreibung notwendiger Sensoren und Messtechnik sowie deren Eigenschaften
- Erstellung eines fertigen messtechnischen Gesamtkonzeptes, welches in weiterer Folge für die Errichtung eines Prototyps verwendet werden kann

Diese Aufgabenstellungen werden sowohl theoretisch (durch Literaturstudien) als auch praktisch durch Zusammenarbeit mit der Wien Energie GmbH und den Projektpartnern des Forschungsprojektes SETE 2 erarbeitet. Die spätere Errichtung sowie Vermessung des Prototyps ist nicht Ziel dieser Arbeit. Es soll eine wissenschaftlich fundierte Auseinandersetzung mit den beschriebenen energie- und messtechnischen Themen stattfinden, um möglichen späteren Problemen entgegenzuwirken.

2 Grundlagen zum technischen Prozess

In diesem ersten Kapitel werden zunächst relevante technische und wissenschaftliche Grundlagen erklärt, um den physikalischen Rahmen der Problemstellungen und den betrachteten Prozess dieser Arbeit an sich zu verstehen. Einerseits werden universelle Grundlagen zu thermodynamischen Kreisprozessen behandelt, wobei speziell auf das Kältemittel CO_2 und die daraus folgende transkritische Prozessführung eingegangen wird. Andererseits wird, um der Arbeit einen Rahmen zu geben, die grobe Entwicklungsgeschichte des SETE-Prozesses in ihren Grundzügen dargelegt.

2.1 Allgemeine Grundlagen zu thermodynamischen Kreisprozessen

Wie im Kapitel 1 bereits erwähnt, ist der SETE-Prozess eine KWKK-Anlage. Der Prozess beinhaltet Komponenten und Funktionsweisen von klassischen Wärmepumpen- bzw. Kälteprozessen, wobei hier zusätzlich zum Strom sowohl die Wärme als auch die Kälte genutzt werden soll. Die Wärme- und Kälteproduktion des SETE-Prozess basiert also zu einem großen Teil auf dem Prinzip des klassischen Kältekreislaufes. Daher wird dieser nachfolgend kurz beschrieben. Die speziellen Herausforderungen des SETE-Prozesses liegen im gewählten Kältemittel CO_2 sowie der daraus folgenden transkritischen Prozessführung.

2.1.1 Der Kältekreislauf

Die erste mechanische Kältemaschine entstand bereits im Jahr 1860 [3]. Seitdem haben sich zahlreiche Prozessvarianten entwickelt, die in ihren physikalischen Grundsätzen ähnlich sind. Wärme kann nicht erzeugt, sondern nur von einem Temperaturniveau zu einem anderen verschoben werden. Der natürliche Wärmefluss erfolgt stets von einem höheren zu einem niedrigeren Temperaturniveau. Der Kälteprozess kehrt diese natürliche Richtung des Wärmeflusses um. Dies geschieht durch die Zufuhr von externer, höherwertigerer Energie und ein geschicktes Prozesslayout. Bei Wärmepumpen und Kältemaschinen, welche sich nur durch das genutzte Temperaturniveau unterscheiden - ob für die Abkühlung oder die Erhitzung der Umgebung -, ergibt sich der typische linksdrehende Kreisprozess [4].

Der ideale Vergleichsprozess für linksdrehende Kreisprozesse ist der Carnotprozess, welcher aus einer isentropen Verdichtung, einer isothermen Kondensation, einer isentropen Entspannung und einer isothermen Verdampfung besteht. Das theoretische Wirkungsgradmaximum eines linksdrehenden Kreisprozesses wird bei diesem Carnotprozess erreicht. Reale Prozesse erreichen jedoch nie dieses Maximum, da eine isotherme Wärmeab- und zufuhr nur unter Vernachlässigung der Druckverluste in den Wärmetauschern erreichbar ist. Eine isotherme Verdichtung und Entspannung sind ebenfalls aus diversen Gründen nicht umsetzbar, bzw. nicht kostengünstig zu erreichen [4].

Die Aggregatzustände des Kältemittels sowie die während des Prozesses stattfindenden Zustandsänderungen sind wesentlich für die funktionierende Wärmezu- und -abfuhr in den einzelnen Komponenten. Die Temperatur und der Druck des Kältemittels bestimmen den Aggregatzustand des Mediums, also ob die Substanz beispielsweise in flüssiger oder gasförmiger Form vorkommt, oder ob mehrere Aggregatzustände gleichzeitig existieren [3]. Beispielsweise geschieht beim traditionellen Kreisprozess die Wärmeabgabe am Verflüssiger an die Umgebung hauptsächlich durch die Verflüssigung des Kältemittels, also durch eine Änderung des Aggregatzustandes.

2.1.2 Subkritischer Kreisprozess

Die Verflüssigung als klassische Form der Wärmeabgabe bei Phasenwechsel vom gasförmigen in den flüssigen Phasenzustand des Kältemittels ist nur bei Anwendungen möglich, die mit Temperaturen unter dem Kritischen Punkt (KP) arbeiten. Prozesse, die den primären Teil der Wärmeabgabe durch diese Verflüssigung bewerkstelligen, werden als subkritische Kreisprozesse bezeichnet. Die auftretenden Temperaturen und Drücke liegen stets unterhalb des Kritischen Punktes (KP) [5]. Beispielsweise arbeiten Kompressionskältemaschinen nach diesem subkritischen Prinzip [6]. Abbildung 1 zeigt so einen subkritischen Kreisprozess mit den bekannten Teilschritten des Kälteprozesses, der Verflüssigung, Expansion, Verdampfung und Verdichtung. Der Kritische Punkt und die daraus resultierende kritische Temperatur setzt die Obergrenze für Prozesse, welche nach dem Prinzip der Wärmeübertragung durch Phasenänderung funktionieren [5].

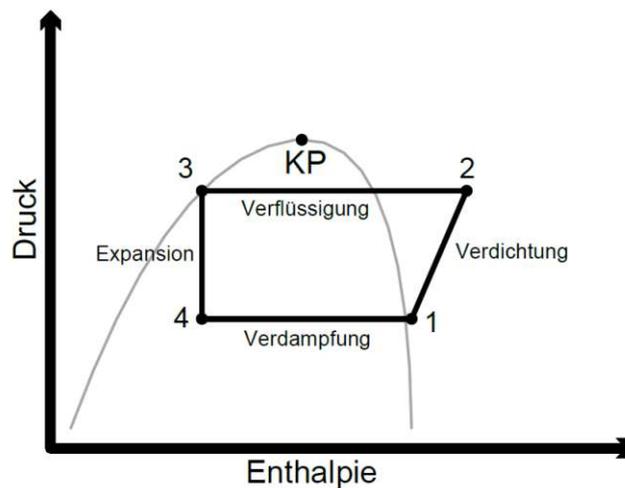


Abbildung 1: Prinzipieller subkritischer Kreisprozess, vergleichlich [5]

2.1.3 Transkritischer Kreisprozess

Wird hingegen der Kritische Punkt in einem beliebigen Punkt des Prozesses überschritten, spricht man von einem transkritischen Kreisprozess. Es existieren also Teilprozesse, in denen Temperaturen und Drücke, über und unter den kritischen Werten vorkommen. Abbildung 2 zeigt einen solchen transkritischen Prozess. Die Wärmeabgabe an die Umgebung erfolgt über der kritischen Temperatur und dem kritischen Druck [5]. Während

der Wärmeabgabe geschieht kein Phasenübergang des Kältemittels. Die Temperatur im wärmeabgebenden Wärmetauscher ist, anders als beim subkritischen Kreisprozess während dem Phasenübergang, nicht konstant, da die Enthalpieänderung des Kältemittels durch Wärmeabfuhr eine Temperaturänderung des Fluids nach sich zieht [7]. Die Abgabe, welche in den Abbildungen 1 und 2 zwischen den Punkten 2 und 3 stattfindet, wird beim transkritischen Prozess als Gaskühlung, und nicht wie im subkritischen Prozess als Verflüssigung bezeichnet. Dies ist deshalb der Fall, weil das Kältemittel nicht flüssig wird, sondern in der transkritischen Phase verbleibt. Diese Änderung des Verhaltens hat auch zur Folge, dass der Wärmetauscher zwischen den Punkten 2 und 3 in transkritischen Prozessen als Gaskühler bezeichnet wird [5].

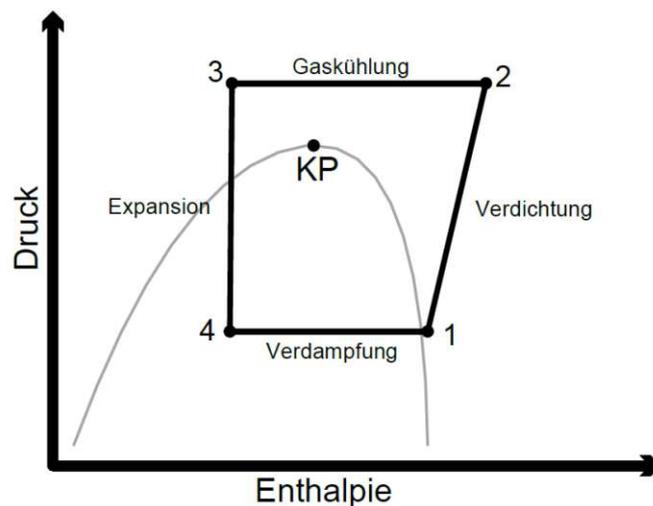


Abbildung 2: *Prinzipieller transkritischer Kreisprozess, vergleichlich [5]*

Befinden sich sämtliche Betriebspunkte eines Kreisprozesses oberhalb des Kritischen Punktes, wird dieser Prozess als superkritischer Prozess bezeichnet. Die Prozesskontrolle gestaltet sich in der Nähe des Kritischen Punktes jedoch als schwierig [6]. Anwendung findet der transkritische Kreisprozess typischerweise bei der Nutzung von Wärmequellen mit niedriger Temperatur wie der Geothermie, bei Müllverbrennungsanlagen oder Wärmerückgewinnungsanlagen [8].

Durch die Verwendung von trans- und superkritischen Prozessführungen wird der Kreis der nutzbaren Kältemittel in den gewünschten Anwendungsgebieten vergrößert, da andere Anforderungen an das Kältemittel entstehen.

2.1.4 Thermodynamik oberhalb des Kritischen Punktes

Der Kritische Punkt ist thermodynamisch definiert als jener Punkt, wo sich die Dichten der flüssigen und gasförmigen Phase angleichen. Oberhalb dieses Punktes, welcher den Endpunkt der Dampfdruckkurve darstellt, gibt es keine thermodynamischen Unterschiede mehr zwischen den beiden Aggregatzuständen [9]. Die genaue Lage des Kritischen Punktes ist stoffabhängig. Der kritische Druck ist jedoch bei fast allen bekannten Stoffen höher als der atmosphärische Druck, daher werden kritische Zustände im Alltag nur selten beobachtet [10]. Die Dampfdruckkurve und die Lage des kritischen Punktes ist

in Abbildung 3 für CO₂ ersichtlich. Der Stoff oberhalb des Kritischen Punktes, welcher als transkritisches Fluid bezeichnet werden kann, ist dicht wie eine Flüssigkeit und hat dieselbe Viskosität wie ein Gas. Die physikalischen Eigenschaften des Fluids in diesem Zustand unterscheiden sich oftmals fundamental von den Eigenschaften unter Normbedingungen [9].

2.1.5 Kältemittel

Ein Kältemittel kann definiert werden als ein natürlicher oder synthetischer Arbeitsstoff, der in der Kälte- und Klimatechnik vielfach thermodynamisch umgewandelt wird und so an der Wärmeübertragung des Prozesses elementar beteiligt ist [11].

Welche Stoffe als Kältemittel zur Anwendung kommen, hängt von vielen Faktoren ab. Neben den thermophysikalischen Anforderungen, wie einer hohen spezifischen Kühlleistung sind vor allem die Sicherheit in der Anwendung (bspw. ungiftig, nicht entflammbar) und eine gute chemische Stabilität (bspw. geringe Reaktivität) geforderte Eigenschaften. In den letzten Jahren rückte eine weitere Anforderung an die Kältemittel in den Mittelpunkt, nämlich die Umweltauswirkungen des Stoffes. Neben der generellen Sinnhaftigkeit geringer negativer Umweltauswirkungen sind eine Vielzahl von Regularien diesbezüglich einzuhalten. Die Umweltauswirkungen von Kältemitteln können durch verschiedene Kennzahlen definiert und in weiterer Folge reglementiert werden.

- **GWP - Global Warming Potential:** Diese Zahl steht für die in der Atmosphäre absorbierte Wärme, die ein Kältemittel mit bestimmter Masse hinterlässt. Das GWP ist eine relative Kennzahl. Es setzt die Eigenschaften des betrachteten Kältemittels in Verhältnis zum Vergleichsmittel Kohlendioxid CO₂. Das GWP eines Gases ist ein Vielfaches der Wärme, die von der exakt gleichen Masse CO₂ in der Atmosphäre absorbiert wird. CO₂ hat definitionsgemäß also ein GWP von 1 [11]. Das GWP wird immer unter Nennung eines Bezugszeitraumes (meist 100 Jahre) angegeben, welcher der angenommenen Verweildauer des Stoffes in der Atmosphäre entspricht [4].
- **ODP - Ozon Depletion Potential:** Abermals handelt es sich um eine relative Kennzahl. Nun wird das betrachtete Kältemittel mit dem Kältemittel R11 (Trichlorfluormethan) verglichen. Die Kennzahl gibt die Auswirkung der Substanz auf den Abbau der Ozonschicht an. Definiert ist das ODP als Verhältnis zwischen dem globalen Ozonabbau durch eine bestimmte Masse des betrachtete Kältemittels und dem globalen Ozonabbau durch dieselbe Masse des Kältemittels R11 [11].

Neben den explizit genannten beiden Maßzahlen gibt es viele weitere Kennzahlen wie das TEWI (Total Equivalent Warming Impact) oder das POCP (Photochemical Ozone Creation Potential) welche ein Kältemittel und deren Auswirkungen auf die Umwelt beschreiben [4] [12].

Welche Kältemittel eingesetzt werden, hängt maßgeblich von den umweltpolitischen Rahmenbedingungen ab. Die wichtigsten hier zu nennenden Umweltabkommen sind das Montreal-Protokoll, das Kyoto-Protokoll, sowie das Kigali-Abkommen. Diese zielen auf ein Verbot von ozonschädigenden und den Treibhauseffekt fördernden Kältemittel ab.

Dieses Verbot trifft in erster Linie die FCKW und HFCKW Kältemittel [13]. Seit 1. Jänner 2015 ist die europäische F-Gase Verordnung Nr. 517/2014 [14] in Kraft, welche den genauen Fahrplan der industriellen Verwendung fluoriierter Treibhausgase (F-Gase) in den Mitgliedsstaaten der EU definiert. Die Kältemittel betreffenden Pfeiler dieser Verordnung sind ein schrittweiser Ausstieg und Beschränkung der am Markt verfügbaren teilfluorierten Kohlenwasserstoffe sowie ein schrittweises Verbot der Verwendung und des In-Umkreis-Bringen von F-Gasen [15]. Für die zuvor beschriebenen Kennzahlen existieren also klar vorgegebene Grenzwerte, welche von einem Kältemittel nicht überschritten werden dürfen.

Kältemittel, die vor 30 Jahren Stand der Technik waren, bspw. R22, sind mittlerweile verboten. Die Gruppe der heute am stärksten diskutierten Kältemittel, welche als Alternativen für die bisher genutzten Kältemittel eingesetzt werden könnten, sind, nach James Calm, die Kältemittel der sogenannten 4. Generation [13]:

- **Low-GWP-Kältemittel** sind Kältemittel mit $GWP < 150$.
- **HFO-Kältemittel** haben eine Doppelbindung zwischen zwei Kohlenstoffatomen (Olefine) wie R-1234yf.
- **Natürliche Kältemittel** wie R744 (CO_2), R717 (Ammoniak) oder R290 (Propan).

CO_2 als Kältemittel

CO_2 (R744), als ein Vertreter der natürlichen Kältemittel, kommt bereits in unterschiedlichen Anwendungsgebieten zum Einsatz. So finden mittlerweile Wärmepumpen und Kälteanlagen mit CO_2 als Kältemittel neben der Industrie- und Gebäudekühlung [16] auch in der Fahrzeugtechnik sowohl bei PKWs [7], als auch im Schienenverkehr [4], als Wärmepumpenwäschetrockner [17] oder als Supermarktkältemaschinen [18] Anwendung. CO_2 als Kältemittel ist alles andere als eine neue Errungenschaft. Im Jahr 1920 war es sogar das am häufigsten genutzte Kältemittel [19]. Nachdem es um 1930 relativ rasch von den ersten synthetischen Stoffen verdrängt wurde [16], wurden um 1989 abermals Untersuchungen zu CO_2 als Kältemittel und Nachfolgemittel der FCKWs angestellt [19].

Laut K. Kosowski [19], ist Kohlenstoffdioxid ein „... farb- und nahezu geruchloses, natürlich vorkommendes Gas, welches weder brennbar noch giftig ist.“ Das Treibhauspotential ist nach der Definition der Kennzahl $GWP = 1$, die ozonschädigende Wirkung nicht vorhanden - $ODP = 0$. Der Kritische Punkt von CO_2 befindet sich bei einer Temperatur von rund $31\text{ }^\circ\text{C}$ und einem Druck von 74 bar. Verglichen mit anderen momentan zur Anwendung kommenden Kältemitteln hat CO_2 eine relativ niedrige kritische Temperatur und einen relativ hohen kritischen Druck [5]. Diese außergewöhnliche Lage des Kritischen Punktes ist dafür verantwortlich, dass entsprechende Anlagen oftmals als transkritische Kreisprozesse ausgeführt sind, siehe Kapitel 2.1.3. Dies führt zu sehr hohen Systemdrücken. Neben dem Nachteil der hohen Belastung für die Anlagenkomponenten ist ein Vorteil dieses hohen Druckes die damit verbundene hohe volumetrische Leistungsfähigkeit solcher Anlagen. Dies ermöglicht im Vergleich zu Anlagen mit anderen Kältemitteln oftmals deutlich kompaktere Bauweisen [18]. Abbildung 3 zeigt das Phasendiagramm von CO_2 mit dem gekennzeichneten überkritischen Bereich, der für transkritische Prozesse besonders relevant ist.

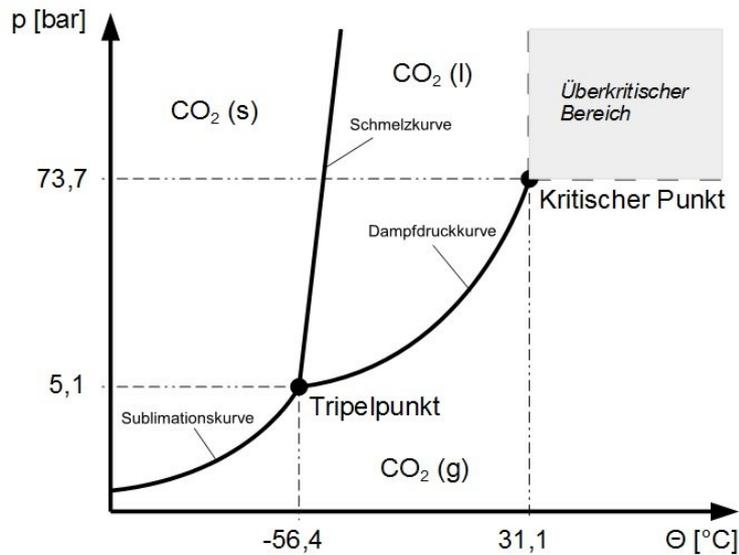


Abbildung 3: Phasendiagramm CO₂ [20]

Weitere Vorteile von CO₂ als Kältemittel, neben den schon erwähnten, sind:

- Der Zugang zu CO₂ ist einfacher als bei anderen Kältemitteln und so unabhängiger von Ort oder Hersteller.
- CO₂ benötigt nach dem Gebrauch kein Recycling und ist daher sehr preiswert.
- Platzanforderungen an die CO₂-Anlagen sind aufgrund der hohen volumetrischen Leistungsfähigkeit sehr gering.
- Die physikalischen und chemischen Eigenschaften von CO₂ sind bekannt und ausgiebig erforscht.

2.2 Der SETE-Prozess

Bei der Entwicklung, Planung und Konstruktion neuartiger Anlagen und Prozesse, von der Idee, hin zu einer fertigen Anlage werden viele verschiedene Stadien und Arbeitsschritte durchlaufen. Diese Arbeitsschritte gehen ineinander über oder folgen aufeinander. Wie in [21] beschrieben, wird meist zwischen den Stadien der Entwicklung und der Planung unterschieden.

Bei der Entwicklung wird technisches Neuland betreten. Diese Phase startet mit einer Idee und einer ersten Ausgestaltung des Prozesses. Da hier noch keine Erfahrungswerte vorliegen, ist die erste Entwicklung mit vielen Gefahren und Risiken verbunden, die so gut wie möglich abgeschätzt werden sollten. Um diese Gefahren zu minimieren und den Prozess an sich besser zu verstehen, müssen Versuche und Experimente durchgeführt werden. Da nicht für jeden Entwicklungsschritt eigene kleine Versuchsanlagen (Pilotanlagen) gebaut werden können, helfen zu Beginn oftmals „virtuelle Versuche“ auf Basis von Simulationen dabei, die Anlage zu erproben. Dabei wird neues Wissen generiert, welches für die Optimierung der nächsten Schritte im Entwicklungsprozess verwendet wird.

Im Gegensatz zum Stadium der Entwicklung kann bei der Planung und Konstruktion

auf bestehende Regeln der Technik zurückgegriffen und so der Prozess konkretisiert werden. Die Auswahl und Zusammenführung der notwendigen Konstruktionselemente ist dafür ein passendes Beispiel. Die Gefahren und Risiken sind bei der Planung an sich deutlich erkennbarer, da Fehler bei den Konstruktionsarbeiten klar durch den Abgleich mit bestehenden Arbeiten, Techniken und Wissen nachgewiesen werden können [21].

Im hier betrachteten Fall des SETE-Prozesses sind die ersten Schritte des Entwicklungsprozesses, durch die Anmeldung eines Patentes sowie durch die Durchführung eines Forschungsprojekts, in dem erste Simulationen erstellt und analysiert wurden, bereits erfolgt. Diese beiden Punkte werden zum besseren Verständnis des Prozesses in den folgenden beiden Unterkapiteln näher beschrieben. Zu Beginn dieser Arbeit befindet sich der SETE-Prozess gerade in der Übergangsphase von der Entwicklungsphase hin zur Planungs- und Konstruktionsphase. Im Zuge des parallel zu dieser Arbeit durchgeführten FTI-Forschungsprojekts SETE 2, näheres dazu in Kapitel 1.1, sowie durch diese Arbeit sollen konkrete Planungen und Konstruktionen zur Realisierung eines zukünftigen Prototyps erfolgen.

2.2.1 SETE - Patentprozess

Der SETE-Prozess in seiner ursprünglichen Form wurde von Richard Krottil und Christian Pinter erfunden und am 15.03.2010 im Patent mit der Nummer AT 507 218 B1 durch das österreichische Patentamt veröffentlicht [22]. Laut österreichischem Patentamt ist das Patent seit 28.03.2022 offiziell in Besitz der Wien Energie GmbH [23]. Das Patent läuft auf den Namen “Verfahren und Anlage zur gekoppelten solarthermischen Strom-, Wärme- und Kälteerzeugung “ woraus sich der Name SETE (**S**olare **e**lektrische und **t**hermische **E**nergiebereitstellung) ableitet. Das Verfahren ist also eine wie in Kapitel 1 beschriebene neuartige Form der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK). Das Patent verspricht im Vergleich zu herkömmlichen KWKK-Anlagen einen verringerten anlagentechnischen Aufwand, geringe Investitionskosten sowie eine höhere Effizienz. Während detaillierte Aufschlüsselungen zu den ersten beiden genannten Vorteilen ausbleiben, ist im Patent [22] ein Gesamtwirkungsgrad η_{KWKK} von 118 % und in einem Bericht der beiden Erfinder [24] sogar von 125 % für ein spezifisches Ausführungsbeispiel für die gekoppelte Strom-, Wärme- und Kältebereitstellung, beschrieben. In diesem Bericht ist sogar von einem theoretischem Gesamtwirkungsgrad bis maximal 180 % die Rede. Die dafür verwendete Gleichung (1) summiert die Kälteleistung \dot{Q}_0 , Kondensatorleistung \dot{Q}_C und elektrische Leistung P_{DM} und zieht lediglich die Pumpleistung P_{PU} davon ab. Die daraus resultierende gesamte nutzbare Leistung wird durch die Antriebsleistung \dot{Q}_H dividiert [24].

$$\eta_{KWKK} = \frac{\dot{Q}_0 + \dot{Q}_C + P_{DM} - P_{PU}}{\dot{Q}_H} \quad (1)$$

Prinzip

Der SETE-Prozess ist im Grunde eine Erweiterung des von P. Noeres [1] beschriebenen klassischen Dampfstrahlkälteprozesses, nur dass zusätzlich zur Kälte für die Klimatisierung auch Wärme für Heizzwecke und Strom zur Verfügung gestellt wird [24]. Die Bereitstellung der Antriebsenergie Dampf erfolgt aus einem Parabolrinnenkollektor oder Reflektor aus thermischer Energie. Der dadurch gewonnene Frischdampf kann in weiterer Folge einem Strahlverdichter zur Kälteproduktion als auch einem Dampfschraubenmotor zur

Strombereitstellung zugeführt werden. Durch eine Massenstromregelung des Frischdampfes kann die jeweilige Bereitstellung reduziert oder erhöht werden. Die Wärmeproduktion für die Heizung bzw. Warmwasserbereitung ist unabhängig von dieser Massenstromregelung und geschieht auf jeden Fall [24]. Als Arbeitsmittel in diesem Prozess ist laut Patent [22] reines Wasser bzw. Ammoniak, abhängig vom gewünschten Einsatzgebiet, vorgesehen. Die wichtigsten Anlagenkomponenten sind ein Dampfschraubenmotor, ein Strahlverdichter, ein Kondensator, ein Verdampfer und ein Dampferzeuger. Erkennbar sind diese in Abbildung 4, welche die Prinzipschaltung des patentierten SETE-Prozesses zeigt. Auf diese Schaltung und auf die darin vorkommenden Hauptkomponenten wird folgend näher eingegangen.

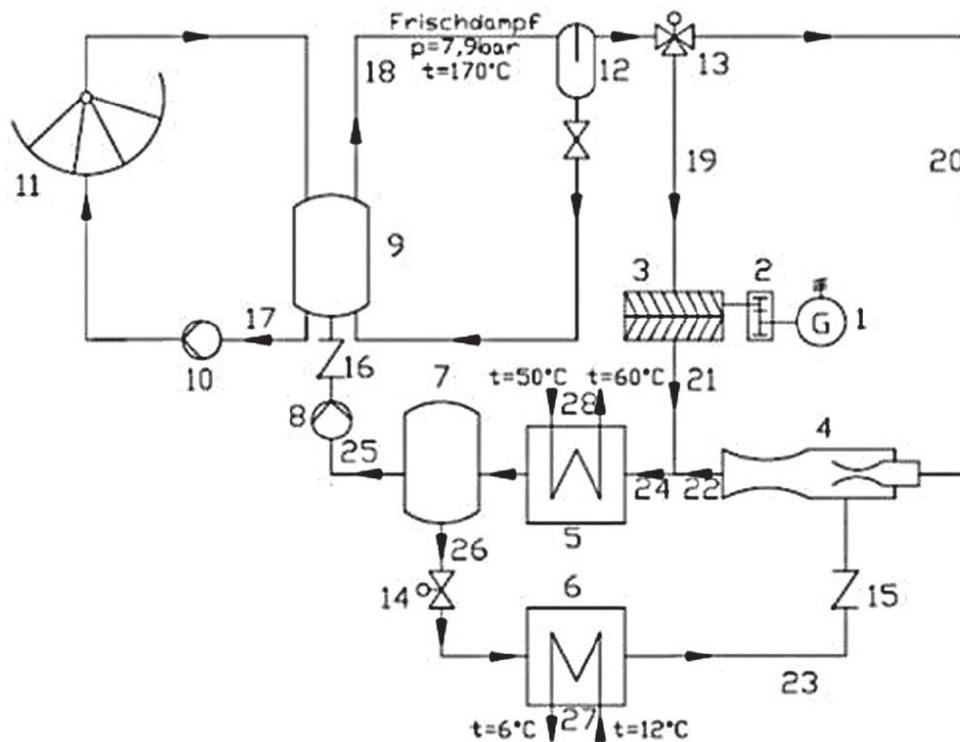


Abbildung 4: Prinzipschaltung des patentierten SETE-Prozesses [22]

Tabelle 1: *Legende zu Abbildung 4*

1. Asynchrogenerator	15. Rückschlagventil
2. Umsetzungsgetriebe	16. Rückschlagventil
3. Dampfschraubenmotor	17. Umlaufverdampferkreislauf
4. Strahlapparat (Verdichter)	18. Frischdampfstrom
5. Heiz-Warmwasser-Wärmetauscher	19. Frischdampfeintritt
6. Kaltwasser-Wärmetauscher	20. Treibdampf
7. Kondensatorsammler	21. Abdampfaustritt
8. Speisewasserpumpe	22. Mischdampf
9. Dampftrommel	23. Saugdampfstrom
10. Verdampferpumpe	24. Kondensatorstrom
11. Solare Dampferzeuger	25. Kondensatorzulauf Speisewasser
12. Dampftrockner	26. Kondensatorzulauf Verdampfer
13. Frischdampfregelarmatur	27. Kaltwasserkreislauf
14. Drosselventil	28. Heiz-/Warmwasserkreislauf

Funktion

Der als Antriebsenergie fungierende Dampf wird solarthermisch in einem Parabolrinnenkollektor/Reflektor (11) bereitgestellt und danach in einer Dampftrommel (9) gespeichert. Dieser Dampf gelangt über eine Frischdampfregelarmatur (13) zu den beiden angeschlossenen Optionen: Zum einen zum Dampfschraubenmotor (3) mit angeschlossenen Asynchrogenerator (1) mithilfe dessen Strom generiert werden kann, zum anderen zum Strahlapparat/Ejektor (4). Dieser Strahlapparat fungiert als Verdichter für den darauf folgenden Kältekreis und ersetzt im Vergleich zum klassischen Kälteprozess einen gewöhnlichen Verdichter (z.B. Kolbenverdichter). Der Dampf, der von der Frischdampfregelarmatur (13) zum Strahlapparat (4) gelangt, dient als Treibdampf (20) für den Verdichtungsvorgang. Über eine indirekte Anbindung eines Heiz-/Warmwasserkreislaufes (28) kann in diesem Wärmetauscher Wärme ausgekoppelt werden. Danach gelangt das Kältemittel über einen Kondensatorsammler (7) und über das auch in einem gewöhnlichen Kältekreis vorkommende Drosselventil zum Kaltwasser-Wärmetauscher, welcher eine indirekte Anbindung eines Kaltwasserkreislaufes (27) ermöglicht. In diesem Wärmetauscher wird die gewünschte Kälte aus dem Prozess ausgekoppelt. Danach gelangt der Saugdampfstrom (23) wieder zum Strahlapparat (4) und wird erneut nach dem Prinzip des Impulsaustausches durch den Treibdampfstrom (20) verdichtet. Ein Teilstrom des Kondensats (25) aus dem Kondensatorsammler wird zur abermaligen Frischdampferzeugung in die Dampftrommel (9) zurückgeführt [22].

Mess- und Regelungstechnisch relevante Punkte des Patents

Zusätzlich zur in Abbildung 4 dargestellten Prinzipschaltung beinhaltet das Patent [22] auch einige weitere Definitionen, die zur Ausführung der Erfindung wichtig sind. Die für diese Arbeit in weiterer Folge relevanten Punkte, die die Mess- und Regelungstechnik des Prozesses betreffen, sollen hier kurz erwähnt werden.

Die Leistungsregelung der Anlage erfolgt ausschließlich über die Menge an Frischdampf, welcher für die Stromgewinnung zum Dampfschraubenmotor, bzw. zur Kältegewinnung zum Strahlapparat geleitet wird. Die Regelung dieses Frischdampfes hat wie bereits

erwähnt keinen Einfluss auf die Wärmebereitstellung. Falls nicht die gesamte anfallende Wärme am Kondensator abgenommen bzw. genutzt werden kann, muss eine ausreichende Möglichkeit der Rückkühlung dieser Wärmemenge vorhanden sein. Um die Rückkühlung großer Mengen an Wärme zu verhindern, sollten ausreichend Pufferungen im Heiz-/Warmwasserkreislauf vorgesehen werden. Im Falle geringer notwendiger Kältemengen, z.B. im Winterbetrieb, wird über die Regelung der Frischdampfmenge ein größerer Teil des Gesamtstroms über dem Dampfschraubenmotor zur Stromgewinnung geleitet. Dieser Strom kann entweder zur Deckung des Eigenbedarfes verwendet oder in das Netz eingespeist werden. Anlagenkomponenten, die Hilfsenergie benötigen, sind unter anderem die Speisewasserpumpe (8), die Verdampferpumpe (10), die Regelung sowie die Pumpen im Heiz- und Kaltwasserkreis (28 & 27). Nach der Kondensation des Kältemittels muss in diesem Betriebsfall der geringen Kältenachfrage das Drosselventil (14) nach dem Kondensatorsammler (7) so geregelt werden, dass mehr Kältemittel über die Speisewasserpumpe (8) der abermaligen Dampferzeugung zugeführt wird. Bei großem Kältebedarf, z.B. im Sommerbetrieb, muss dementsprechend mehr Frischdampf zum Strahlapparat (4) geleitet werden und es muss ein genügend großer Teil des Gesamtstroms zur Kaltwasserproduktion zum Verdampfer (6) über das Drosselventil (14) gelangen.

Bei der Rückführung des Arbeitsmittels vom Kondensatorsammler (7) zur Dampferzeugung ist auf eine kontinuierliche Regelung des Zulaufs besonders Wert zu legen. Ansonsten kann es zu Problemen bei der Strom-, Wärme-, und Kältebereitstellung kommen. Eine drehzahlgeregelte Speisewasserpumpe (8) kann hier in Kombination mit einer Füllstandsmessung in der Dampftrommel (9) Abhilfe schaffen [22].

2.2.2 SETE - Modifizierung des Prozesses und erste Simulationen

Wie zu Beginn des Kapitels 2.2 beschrieben, liegen zum aktuellen Zeitpunkt neben der Patentschrift auch erste Simulationsergebnisse und Modifizierungen zum SETE-Prozess vor. Diese Simulationen wurden im FTI-Forschungsprojekt "SETE - Dezentral alles aus einer Hand" aus dem Jahr 2021 durchgeführt [25].

Das Ziel dieses Forschungsprojektes war es, ein thermodynamisches Simulationsmodell für den SETE-Prozess zu erstellen, mithilfe dessen die Eigenschaften und Wirkungsgrade bei verschiedenen Anwendungsfällen eruiert werden können. Konkret wurden zwei Use Cases definiert: ein innerstädtischer und ein etwas außerhalb gelegener Aufstellungsort. Durch diese beiden Cases wurden die Möglichkeiten der zukünftigen Anwendungen näher untersucht. Aufgrund des Arbeitsmediums Wasser und dieser gewählten Gebiete, die die Randbedingungen der Simulation darstellen, wurden geringfügige Modifizierungen an der Grundverschaltung des SETE-Prozesses aus dem Patent durchgeführt, siehe Abbildung 5 und 6. Dabei war die Integration des Wiener Fernwärmenetzes als Temperatur- und Energiequelle anstelle der solaren Dampferzeuger einer der wesentlichsten Punkte. Weiters soll durch eine mehrstufige Wärmeauskopplung die Auskühlung des Fernwärmemediums verbessert werden. Konkret durchströmt das Fernwärmemedium nicht nur den eigentlichen Dampferzeuger, sondern auch einen dem Dampferzeuger vorgeschalteten Vorwärmer sowie einen weiteren Wärmetauscher. Die sekundäre Seite des Vorwärmers wird vom Prozessmedium durchströmt und soll so besser auf die Verdampfung vorbereitet werden. Der zusätzliche dritte Wärmetauscher dient zur Erwärmung des Brauchwassers bzw. des sekundären Fernwärmenetzes [25]. Das Wiener Fernwärmenetz besteht neben dem besonders heißen primären Verbundnetz aus mehreren kleineren sekundären Fernwärmenetzen mit niedrigerer Temperatur.

2 Grundlagen zum technischen Prozess

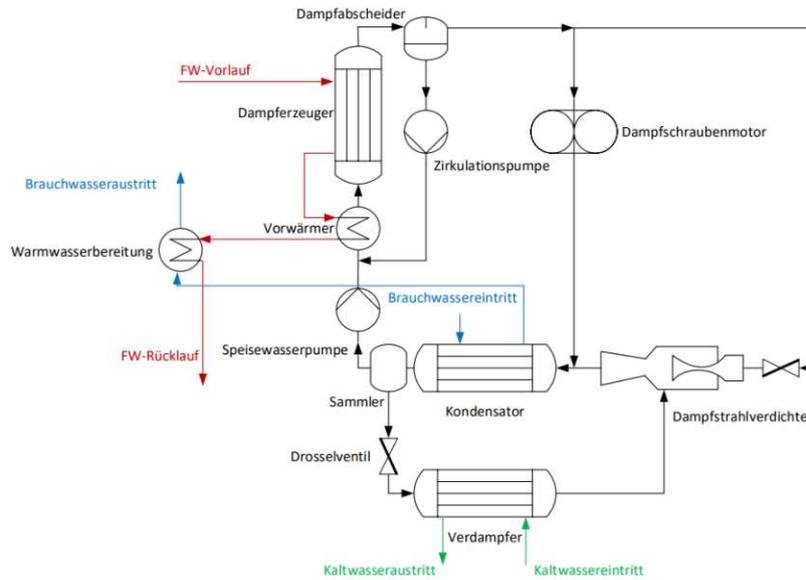


Abbildung 5: *Modifizierte Verschaltung des SETE-Prozesses für die Integration des Prozesses in verschiedenen Gebieten für Use Case 1 - innerstädtische Aufstellung [25]*

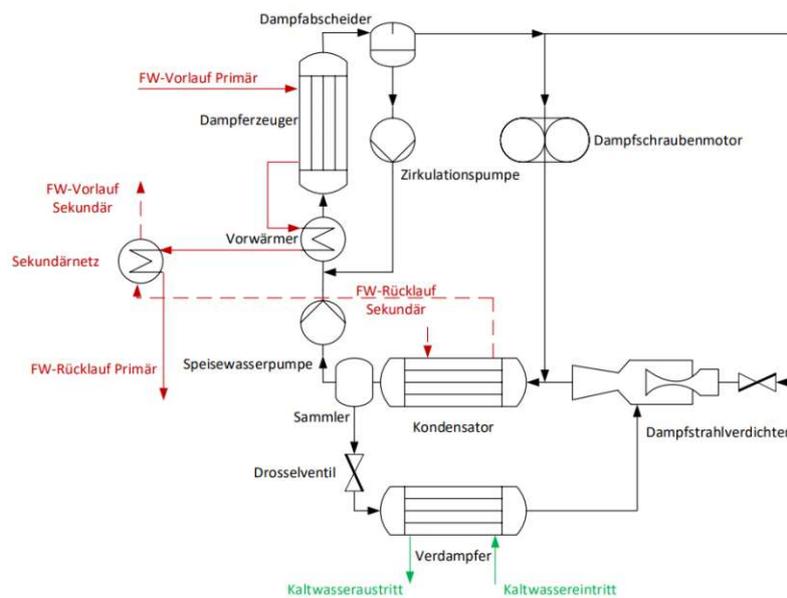


Abbildung 6: *Modifizierte Verschaltung des SETE-Prozesses für die Integration des Prozesses in verschiedenen Gebieten für Use Case 2 - städtisches Einzugsgebiet [25]*

Im Use Case 1 (innerstädtischer Bereich) ist die Temperatur des Fernwärmenetzes tendenziell höher als bei Use Case 2 (städtisches Einzugsgebiet). Diese höheren Temperaturen sollen vorwiegend dazu verwendet werden, um thermische Energie für die Wärmebereitstellung, in Form von Heizenergie sowie zur Warmwasserbereitung, herzustellen. Die Kälteenergie des Prozesses ist in diesem Fall als Nebenprodukt zu verstehen und die

Stromproduktion hat eine untergeordnete Rolle. Im Gegensatz dazu liegt der Fokus im Use Case 2 einerseits auf der Nutzung von thermischer Energie zur Erwärmung eines Sekundärnetzes anstelle von direkter Heizenergie oder Brauchwassererwärmung, andererseits auf der Gewinnung elektrischer Energie. Diese kann beispielsweise zur Abdeckung des Eigenbedarfes, bzw. zur Einspeisung in ein Stromnetz verwendet werden [25]. Die Kälteenergie spielt hier eine untergeordnete Rolle.

Simulationsmodell und Randbedingungen

Das entstandene thermodynamische Simulationsmodell des Prozesses basiert auf Randbedingungen (festgelegt durch die gewählten Use Cases sowie die Parameter des Wiener Fernwärmenetzes) sowie auf Literaturdaten und Komponentenspezifikationen. Es gibt unzählige Möglichkeiten, ein Simulationsmodell und die dazugehörigen Gleichungssysteme aufzustellen. Sämtliche Simulationen wurden allerdings ausschließlich mit Programmen durchgeführt, die gleichungsorientierte Lösungsmethoden verwenden. Die beiden verwendeten Softwaretools waren EES (Engineering Equation Solver) und IPSEpro, welche eine Vielzahl der notwendigen Komponentenmodelle bereits integriert haben [25]. In dieser Arbeit wird nicht näher auf die mathematischen Hintergründe der Simulationen eingegangen, da hier die grobe Entstehungshistorie des SETE-Prozesses im Fokus steht.

Die notwendigen Randbedingungen stützen sich einerseits auf Annahmen zu den generellen Komponentenwirkungsgraden und Druckverlusten, andererseits auf spezielle isentrope Wirkungsgrade η_{is} . Letztere berücksichtigen die Abweichung von adiabaten und reversiblen Zustandsänderungen zu den realen Verhältnissen. Die Fernwärmeleistung ist in den beiden Use Cases mit 1,274 MW bzw. 1,578 MW festgelegt worden. Die Nenntemperaturen des Fernwärmesystems sind in beiden Fällen mit 140/50°C angenommen worden, wobei jeweils Sommer und Winterfälle unterschieden werden. Die maximale Versorgungstemperatur von max. 140 °C wird jedoch nie überschritten. Die Temperaturniveaus der Kondensatorseite unterscheiden sich in den beiden Use Cases, einmal 65/10 °C und einmal 65/40 °C. Das Temperaturniveau des Verdampfers, also der Kälteauskopplung, ist in beiden Fällen ident mit 6/12 °C.

Simulationsergebnisse

Im Zuge der Simulationen wurden verschiedenste Korrelationen und Parameter analysiert und untersucht, welche im Endbericht [25] ausführlich beschrieben sind. Diese Analysen beschäftigen sich im Speziellen mit verschiedenen Abhängigkeiten der Kälte- bzw. elektrischen Leistungen sowie der Gesamteffizienz. Es wurden unzählige Simulationsergebnisse bzw. -erkenntnisse beschrieben. Vier ausgewählte, für die weitere Entwicklung des SETE-Prozesses bzw. diese Arbeit als relevant befundene Ergebnisse werden nachfolgend aufgelistet:

- Der Gesamtwirkungsgrad η_{cycle} des modifizierten SETE-Prozesses im ersten beschriebenen Use Case (innerstädtischer Bereich) liegt bei der simulierten Prozessführung zwischen 112 % und 119 %. Das Ergebnis ist zwar weit von den in [24] beschriebenen 180% entfernt, stimmen jedoch gut mit den im Patent [22] genanntem η_{cycle} von 118 % überein. Wichtig anzumerken ist hier, dass die Simulation eine nicht optimierte Prozessführung abbildet. Theoretisch ist also sogar noch eine Steigerung des

maximalen Wirkungsgrads zu erwarten. Im Anwendungsfall des Use Case 1 bringt diese neuartige KWKK-Technologie also einen erheblichen Mehrwert gegenüber anderen konventionellen KWKKs [25].

- Der Gesamtwirkungsgrad η_{cycle} des modifizierten SETE-Prozesses im zweiten beschriebenen Use Case (städtisches Einzugsgebiet) beträgt bei der simulierten Prozessführung knapp 101 %. Ein Mitgrund für diesen, im Vergleich zum erste Use Case niedrigeren, Gesamtwirkungsgrad sind die veränderten Kondensatortemperaturen zum Use Case 1. Diese Erhöhung der Simulationsparameter von 65/10 °C auf 65/40 °C entspricht einer Erniedrigung der sekundären Spreizung von 55 °C auf 25 °C und senkt den Gesamtwirkungsgrad erheblich [25].
- Bei der Betrachtung der einzelnen Kältewirkungsgrade stellte sich heraus, dass auch hier die Spreizung der Sekundärseite des Verdampfers maßgeblich den Wirkungsgrad beeinflussen. Je größer die Spreizung, desto größer der Kältewirkungsgrad [25].
- Der Wechsel der Energiequelle weg von einem solarthermischen Erzeuger hin zur Fernwärme beeinflusst die Gesamteffizienz des Prozesses signifikant, da dieser Wechsel eine Erniedrigung der Quelltemperaturen von größer 170 °C hin zu max. 140 °C nach sich zieht [25].

Speziell die Erkenntnis aus dem letzten beschriebenen Punkt sowie der hohe Siedezustand von Wasser als Arbeitsmittel hat eine weitere Modifizierung des SETE-Prozesses angeregt. Diese Modifizierung betrifft das Arbeitsmedium Wasserdampf des Prozesses, welches in den Simulationen variiert werden sollte. Aufgrund verschiedener Tatsachen, unter anderem um einen niedrigeren Siedepunkt des Arbeitsfluids zu erhalten, wurden alternative organische Arbeitsmedien simuliert. Durch diese Veränderung des Prozesses hin zu einer ORC-Variante (Organic Rankine Cycle) erhofft man sich eine deutliche Steigerung der Effizienz. Es wurden drei weitere Simulationen des Use Case 1 durchgeführt, wobei drei verschiedene Arbeitsmedien verwendet wurden. Dies waren R245fa (1,1,1,3,3-Pentafluorpropan), R600 (Butan) sowie CO₂. Bei der Verwendung der beiden erstgenannten Arbeitsmittel konnte eine deutliche Verbesserung der Gesamteffizienz erzielt werden. Diese berechnet sich auf 158 %, was deutlich über dem höchsten Wert mit Wasserdampf liegt. Die signifikanteste Verbesserung und den somit höchsten Wert des Gesamtwirkungsgrades η_{cycle} erzielte der Prozess mit CO₂ als Arbeitsmittel. Dieser Prozess ist als sogenannter überkritischer oder transkritischer Prozess ausgeführt, und erreicht dadurch einen simulierten Gesamtwirkungsgrad von $\eta_{\text{cycle}} = 190,1\%$ [25]. Dieses Simulationsergebnis ist der Grund, wieso der in dieser Arbeit betrachtete Prozess mit CO₂ als Arbeitsmittel entwickelt werden soll. Nähere Details zu transkritischen CO₂-Prozessen sind in Kapitel 2.1.3 angeführt.

3 Grundlagen zur Mess- und Regelungstechnik

3.1 Messtechnik

Die Messtechnik ist ein essenzieller Bestandteil von nahezu allen Bereichen der Forschung in Naturwissenschaft und Technik. Sie liefert die notwendigen Informationen, um einen physikalischen Zustand klar zu definieren. Die Kernaufgabe der Messtechnik besteht also darin, physikalische Größen zu einer bestimmten Zeit an einem bestimmten Ort mit einer bestimmten Genauigkeit zu erfassen. Dieser Erkenntnisgewinn passiert durch den Vorgang des Messens.

Nach R. Parthier [26] ist die Definition des Messens „das Ausführen von geplanten Tätigkeiten zum quantitativen Vergleich der Messgröße mit einer Maßeinheit.“

Der Begriff der Messgröße bezeichnet hier jene physikalische Größe, welche Gegenstand einer Messung sind, entweder als die zu messende Größe, oder die gemessene Größe. Im Idealfall sind diese beiden Größen identisch. Die Messgrößen helfen also dabei, Eigenschaften von bestimmten Zuständen, Körpern, Verfahren oder Prozessen zu identifizieren [27]. Damit eine Messung auch wirklich den gestellten und verlangten Anforderungen genügt, sind bei der Auswahl der Messgröße folgende zwei Dinge zu beachten. Zum einen muss der Messort, also auch die Messzeit sorgfältig ausgewählt werden, damit der erhaltende Messwert die zu messende Größe repräsentativ abbildet. Dabei ist darauf zu achten, dass die Messeinrichtung die eigentliche Messgröße so gering wie möglich beeinflusst. Zum anderen muss der Zusammenhang zwischen der Messgröße und der gewünschten quantitativen Aussage hinreichend bekannt und reproduzierbar sein [28].

Die in der Verfahrenstechnik am häufigsten gemessenen physikalischen Größen sind die Temperatur, der Durchfluss sowie der Druck einer Anlage. Ungefähr 70 % aller Messstellen von Produktionsanlagen messen eine dieser drei Größen [29].

3.1.1 Messsysteme

Ein Messsystem beschreibt das für die Messung einer physikalischen Größe notwendige System. Die Komplexität des Messsystems hängt unter anderem sowohl von der Art der Messaufgabe als auch vom verwendeten Messverfahren ab. Die wichtigsten Komponenten bleiben jedoch meist gleich. Diese allgemeine Struktur eines Messsystems ist in Abbildung 7 abgebildet.



Abbildung 7: Allgemeine Struktur eines Messsystems [27]

Reale Messsysteme können, müssen jedoch nicht alle in Abbildung 7 vorkommenden Komponenten enthalten. Jene, in der als **Messkette** bezeichneten Darstellung abgebildeten Komponenten sind:

- der **Aufnehmer**, besser bekannt als Sensor oder auch Fühler, hat am Eingang die zu messende Größe u anliegen und liefert am Ausgang ein von der Messgröße und der Zeit t abhängiges Ausgangssignal $x_s(t)$. Dieses ist meist ein elektrisches Signal.
- der **Messumformer** wandelt das vom Aufnehmer kommende Messsignal $x_s(t)$ durch Digitalisierung, Speicherung, Filterung oder mithilfe anderer Funktionen in ein geeignetes, oft normiertes Ausgangssignal $x_n(t)$ um.
- die **Signalverarbeitung** ermittelt aus dem Eingangssignal $x_n(t)$ das letztendliche Messergebnis, den Messwert y . Meistens wird hierfür das Signal digitalisiert [27].

Neben der Messgröße u können auch noch andere Größen Einfluss auf das Messsystem haben. Störgrößen $z(t)$ können aus verschiedenen Gründen entstehen und auf den Aufnehmer einwirken. Ziel jedes Messsystems ist es, unabhängig von der Menge an Einflussgrößen die darauf einwirken, allein die Messgröße u zu berücksichtigen und so die Ausgangsgröße y abzubilden. Dies kann z.B. durch eine Kompensation der Störgrößen teilweise gewährleistet werden [27].

3.1.2 Messmethode

Die Messmethode beschreibt die Art und Weise, wie eine Messgröße erfasst wird. Kenntnisse der, der Messung zugrunde liegenden, physikalischen Phänomene und Zusammenhänge sind maßgeblich, um einen Messerfolg zu erzielen. Die generelle Messmethode steht in keinem direkten Zusammenhang zu einer spezifischen Messgröße, sondern beschreibt die grundlegende Vorgehensweise der Messung. Es gibt verschiedene Ansätze, wie man Messmethoden charakterisieren kann. Eine häufige Unterteilung ist jene in direkte und indirekte Messmethoden.

Bei der **direkten** Messung wird die zu messende Größe mit einem Referenzwert derselben physikalischen Größe verglichen, und dadurch auf den Messwert geschlossen. Dies sind beispielsweise Verfahren, bei denen direkt ein Messergebnis angezeigt wird, ohne dass eine zusätzliche Umwandlung stattfinden muss [28].

Bei der **indirekten** Messung kann kein direkter Vergleich zweier gleicher physikalischer Größen stattfinden, stattdessen muss der Messwert über den Umweg einer andersartigen physikalischen Größe bestimmt werden. Der exakte Zusammenhang zwischen diesen unterschiedlichen physikalischen Größen muss hier hinreichend bekannt sein. Bei der Kalibrierung wird der richtige Zusammenhang der Messgrößen, in Form von Skalen, hergestellt. Ein Beispiel für eine indirekte Messung ist die Temperaturmessung anhand eines Widerstandsthermometers [28].

R. Parthier [26] beschreibt eine andere Unterscheidung der Messmethoden. Dort werden die drei folgenden Methoden unterschieden, denen ein Großteil der klassischen Messverfahren zugeteilt werden kann:

- **Ausschlagmethode:** Die Ausschlagmethode ist eine wie zuvor beschriebene direkte Messmethode, da das Eingangssignal ohne Umwandlung direkt in eine Ausgangsgröße überführt wird. Sie basiert darauf, dass die Verschiebung eines Markers/Zeigers auf einer Skala das Messergebnis darstellt, welches direkt von der Größe beeinflusst wird. Die Auswirkung des Messvorganges auf die Messgröße soll bekannterweise so minimal wie möglich sein, um das Messergebnis nicht zu verfälschen. Um die Verschiebung des Markers/Zeigers zu realisieren wird normalerweise keine externe Hilfsenergie benötigt, da die erforderliche Energie dem Messobjekt entzogen wird. Dies stellt allerdings eine direkte Beeinflussung des Messobjektes durch die Messung dar und kann gravierende Auswirkungen auf das Messergebnis haben. Ein Beispiel für eine Messung, die nach dem Prinzip der Ausschlagmethode arbeitet, ist die elektrische Spannungsmessung mit klassischen Drehspulmesswerken.
- **Differenzmethode:** Messungen, die auf der Differenzmethode basieren, haben einen deutlich geringeren Einfluss auf das Messobjekt als solche, die auf der Ausschlagmethode basieren. Die Verminderung der Rückwirkung wird durch einen Vergleich der Messgröße mit einer Referenzgröße verwirklicht. Um den gesuchten Messwert zu erhalten, wird die Differenz zwischen Mess- und Referenzgröße analysiert und interpretiert. Das Messergebnis unterliegt hier Störeinflüssen, deren Wirkung von der Größe der beobachteten Differenz abhängt. Ein Beispiel für eine Messung, die nach dem Prinzip der Differenzmethode arbeitet, ist die klassische Neigungswaage oder die Temperaturmessung mittels Thermoelemente.
- **Kompensationsmethode:** Eine Weiterentwicklung der Differenzmethode, bzw. des Prinzips des Vergleichens, ist die Kompensationsmethode. Hier wird die Messgröße nicht mit einer konstanten Referenzgröße verglichen und die Differenz betrachtet, sondern eine variable Vergleichsgröße verwendet, die sich ständig der Messgröße anpasst und zur Messgröße eine Differenz von Null ergibt. Durch diese ständig angestrebte Nullung der Differenz ist die sogenannte Kompensationsgröße ein unmittelbarer Indikator für den zu ermittelnden Messwert. Diese Methode hat neben einer extrem hohen Genauigkeit weiters den Vorteil, dass dem Messobjekt keine Energie entzogen wird, und die Rückwirkung auf das Messobjekt gering gehalten wird. Störungen, die sowohl auf die Messgröße als auch auf die Kompensationsgröße einwirken, haben keinen Einfluss auf das Messergebnis. Ein Beispiel für eine Messung, die nach dem Prinzip der Kompensationsmethode arbeitet, ist die klassische Apothekerwaage [26].

3.1.3 Messort

Die Wahl des richtigen Messortes ist für ein akzeptables Messergebnis ebenso entscheidend wie die Wahl der Messgröße und Messmethode. Was bei einer Aufgabenstellung den idealen Messort darstellt, kann bei einer anderen Aufgabenstellung zu fundamentalen Fehlaussagen führen. Um den richtigen Messort abhängig von der Aufgabenstellung definieren zu können, ist eine ausreichende Kenntnis über den Aufbau der Anlage eine

essenzielle Voraussetzung. Ist diese Kenntnis unzureichend, muss vor Auswahl des Messortes ein genaues Bild der Anlage verschafft werden.

Bei Mengen-, Durchfluss- und Zustandsmessungen bestimmt das angewendete Messverfahren zu großen Teilen den Messort bzw. im Speziellen den örtlichen Aufbau der Messstrecke. Oftmals geben diese Anforderungen an den Aufbau und den Messort, z.B. notwendige Ein- und Auslaufstrecken, sogar die Auslegungs- und Planungsparameter der Anlage vor [28].

Messgrößen wie die Temperatur oder die Strömungsgeschwindigkeit in einem Rohr sind sogenannte Feldgrößen, welche per Definition ortsabhängig sind. Die Lage und die genaue Positionierung des Messortes bestimmen also in direkter Weise den Wert der erfassten Messgröße. Dementsprechend werden hier häufig Mittelungen über verschiedene Messorte und mehrere Messgrößen durchgeführt [28].

3.1.4 Messbereich

Ein weiterer wichtiger Begriff bzw. Parameter, auf den bei einer Messung besonders geachtet werden muss, ist der Messbereich. Darunter versteht man den Bereich, in dem das Messgerät ein Messergebnis innerhalb bestimmter Messabweichungen garantieren kann [30]. Der Messbereich ist also eine Größe, die vom Hersteller für jedes Messgerät angegeben werden muss. Der Messwert einer Messung sollte unbedingt in diesem angegebenen Wertebereich liegen, da ansonst keine gesicherten Auskünfte über die Genauigkeit des Messergebnisses gegeben werden können. Dieser Bereich wird in der Regel entweder durch die explizite Angabe des Messbereichsanfangs- und -endwertes definiert oder durch eine Prozentangabe vom maximal zulässigen Messwert [30].

Die Auswahl eines günstigen Messbereichs hängt von der Charakteristik der realen Messkennlinie des verwendeten Messsystems ab. Der ideale Messbereich sollte einen möglichst linearen Teil der Kennlinie umspannen, der eine hohe Steigung aufweist [27].

3.1.5 Messsignale - Klassifizierung

Innerhalb der in Abbildung 7 dargestellten Messkette muss die Information über die Messgröße u ständig von einer Komponente zur anderen weitergegeben werden. Diese Informationsweitergabe gelingt durch das Messsignal $x(t)$. Meist ist dies ein elektrisches Signal, welches sich als Träger der eigentlichen Messgröße u definieren lässt. Selbst bei konstanten Messgrößen u ist dieses Trägersignal meist selbst zeitlich veränderlich [27]. Welcher physikalische Parameter des Signals die zu übertragende Information trägt, ist von der Messanforderung abhängig. Dies kann unter anderem die Amplitude, die Frequenz oder der Phasenwinkel sein. Um ein Messsignal klar beschreiben und klassifizieren zu können - unabhängig davon, ob es ein elektrisches, mechanisches oder ein anderes Signal ist -, werden nachfolgende Eigenschaften von Messsignalen bezüglich deren Signalform näher definiert [26].

- **Analog** oder **diskret**:

Während bei analogen Signalen der Informationsparameter beliebig viele Werte innerhalb eines bestimmten Wertebereiches annehmen kann, ist dieser Informationsparameter bei diskreten Signalen auf endlich viele Werte begrenzt. Als typisches

Pendant zum Analogsignal ist ein digitales Signal diskret. Ein Vorteil diskreter Signale ist, dass sich Störeinflüsse erst nach Überschreitung gewisser Grenzwerte in der Messgröße bemerkbar machen, während analoge Signale einfach durch externe Störsignale beeinflusst werden. Einer der essenziellsten Nachteile diskreter Signale ist der Informationsverlust, der bei der Abbildung analoger Messwerte auf diskreten Signalen entsteht.

- **Kontinuierlich** oder **diskontinuierlich**:

Bei kontinuierlichen Messsignalen kann der Informationsparameter jederzeit seinen Wert ändern, während diskontinuierliche Signale dies nur zu bestimmten Zeitpunkten können. Dem offensichtlichen Vorteil kontinuierlicher Signale, nämlich der zeitlich genauen Nachverfolgung des Verlaufs der Messgrößen, steht der Nachteil einer oftmals unnötig großen Informationsmenge gegenüber. Durch die kontinuierliche zeitliche Auflösung wirken sich Störungen jederzeit und direkt aus, während Störungen zwischen den Zeitpunkten der Änderung des Informationsparameters bei diskontinuierlichen Signalen keine Auswirkungen haben.

- **Determiniert** oder **stochastisch**:

Im Gegensatz zu determinierten Größen, welche sich durch klar beschreibbare Zusammenhänge definieren und durch eine einmalige Messung bestimmen lassen, sind stochastische Größen nur durch Methoden der Statistik und mehrmaliger Messung beschreibbar. Sowohl ihr Auftreten als auch ihr Wert sind zufallsbehaftet. Da in den meisten Anwendungen die Determiniertheit des Messsignals vorausgesetzt wird, wird ohne die explizite Erwähnung der stochastischen Eigenschaften eines Signals, von dessen Determiniertheit ausgegangen [26].

3.1.6 Messabweichungen

Ziel einer jeden Messung ist es, ein Messergebnis zu erhalten, welches sich dem wahren Wert der Messgröße bestmöglich annähert. Im Idealfall entspricht das Messergebnis dem realen Wert. Aufgrund vieler bekannter als auch unbekannter Einflussfaktoren, die auf den Messvorgang wirken, ist dies tatsächlich jedoch nicht oder kaum realisierbar. Deswegen ist es unabdingbar für jede reale Messung, die Messabweichung mitanzugeben, um die Qualität des Messergebnisses interpretieren zu können. In [26] wird dies gut zusammengefasst mit den Worten: „Somit ist letztendlich trotz aller messtechnischen Aufwendungen zur Kenntnis zu nehmen, dass ein Messergebnis nur ein Schätzwert des wahren Wertes einer Messgröße sein kann!“ Diese Differenz e zwischen dem aus der Messung gewonnenen Messwertes x_M und dem wahren Wert x_W wird als die Messabweichung bezeichnet [28]. Die Verwendung des Begriffes des *wahren Wertes* x_W ist in der messtechnischen Praxis umstritten, da der wahre Wert einer Messgröße nie bekannt sein kann. Deshalb wird oftmals auch der Begriff des *realen Wertes* x_R verwendet [26].

$$e = x_M - x_R \quad (2)$$

Umgangssprachlich wird die Messabweichung auch als Messfehler bezeichnet, woher auch das oft verwendete Formelzeichen e für “error“ stammt [28]. Der Begriff *Fehler* unterliegt verschiedensten Definitionen und kann daher unterschiedlich interpretiert werden, deshalb wird in dieser Arbeit lediglich von Messabweichungen gesprochen.

Um Messabweichungen, unabhängig von ihren Einheiten, miteinander vergleichen zu können, ist es häufig von Vorteil nicht nur die **absolute Messabweichung** e zu betrachten, sondern die Abweichung in Relation zum realen Wert x_R zu setzen. Damit kommt man zur **relativen Messabweichung** e_{rel} .

$$e_{\text{rel}} = \frac{e}{x_R} \quad (3)$$

Die Einheit der absoluten Messabweichung e ist dieselbe wie die der zu messenden Größe. Die relative Messabweichung e_{rel} ist dimensionslos und wird meist in Prozent angegeben.

Ursachen für Messabweichungen

Prinzipiell unterliegt jede Messung einer Abweichung [27]. Die Gründe dafür können sehr unterschiedlich sein. Der Ursprung der Abweichung kann im Messgegenstand selbst, der Messeinrichtung oder dem Messverfahren liegen. Auch externe Umwelteinflüsse haben Einfluss auf das Messergebnis.

Es lassen sich zwei grundlegende Abweichungsklassen definieren:

- **Systematische Messabweichung:**

Nach F. P. Leon [27], sind die Ursachen von systematischen Messabweichungen und deren Einwirkung in der Regel bekannt. M. Rudolph und U. Wagner [28] relativieren diese Aussage und sprechen von einer grundsätzlichen Reproduzierbarkeit der Messabweichung unter gegebenen Einsatzbedingungen, was nicht heißt, dass die Abweichung zur Gänze quantitativ bekannt ist. Die Ursachen von systematischen Fehlern können verschieden sein. Beispiele dafür sind Ablesefehler des*der Beobachter*in, technische Nicht-Berücksichtigung von Umwelteinflüssen wie der Eigenerwärmung des Messobjektes oder die Rückwirkungen des Messgerätes auf die Messgröße. Prinzipiell ist die Kompensation der systematischen Messabweichung z.B. durch eine Erhöhung des Messaufwandes und dadurch einer Verbesserung des Messsystems möglich. Auch eine nachfolgende Korrektur des Messwertes durch die Berücksichtigung der bekannten systematischen Messabweichung ist eine gängige Methode.

- **Zufällige Messabweichung:**

Die grundsätzliche Reproduzierbarkeit ist bei zufälligen Messabweichungen nicht gegeben [26]. Bei wiederholenden Messungen streuen die Messabweichungen und weisen bei gleichbleibenden Messbedingungen unterschiedliche Beträge und Vorzeichen auf. Zufällige Messabweichungen sind stochastisch und als solche isoliert betrachtet nicht erfassbar, da ihre Ursache oftmals unbekannt ist [27]. Erst eine Mittelwertbildung und die Anwendung statistischer Methoden über mehrere Messungen verleiht dem Messergebnis und der entsprechenden Messabweichung eine gewisse Aussagekraft. Zufällige Messabweichungen haben oft mehrere Ursachen, deren Endwirkung als Kombination der Einzeleinflüsse gesehen werden kann. Diese Tatsache macht die Analyse der quantitativen Auswirkung von zufälligen Messabweichungen so schwierig [28].

Um einzelne Messabweichungen genau definieren und verstehen zu können, ist ein detailliertes Systemverständnis notwendig. Durch mangelnde Kenntnis des Messsystems können zum Beispiel in Wahrheit deterministische Messabweichungen fälschlicherweise

als stochastisch deklariert werden. In der oben genannten Klassifizierung der Messabweichungen in systematisch und zufällig steckt also eine gewisse Willkür und Unsicherheit [27].

3.1.7 Automatisierungspyramide - Feldebene

Die Messtechnik macht nur einen kleinen Teil des Gesamtprozesses aus. Sie steht dennoch mit sämtlichen Technologien und Teilprozessen, die für den erfolgreichen Betrieb eines technischen Gesamtprozesses notwendig sind, in Beziehung. Die Komplexität der einzelnen Technologien nimmt stetig zu, so auch deren generierte Datenmenge. Um mit dieser steigenden Komplexität und den entstehenden Beziehungen umgehen zu können, ist es notwendig, die einzelnen Prozesse in eine hierarchische Abfolge zu bringen [30]. Ein gängiges Mittel diese hierarchische Ordnung darzustellen, ist die sogenannte Automatisierungspyramide. Es gibt unzählige Modelle dieser Pyramide, die sich oftmals nur im Detail unterscheiden. Die klassische Automatisierungspyramide besteht aus mehreren strikt voneinander getrennten Hierarchieebenen, die übereinander angeordnet sind [31]. Jede dieser Ebenen verlangt eigene Strategien und Mittel zur Kommunikation innerhalb der Ebene, da sich die Anforderungen sowie Datenmengen zwischen den Ebenen stark unterscheiden.

Die in Abbildung 8 dargestellte Automatisierungspyramide nach Siepmann basiert auf der Normenreihe DIN EN 62264 [31]. Dieses Modell vereint Eigenschaften verschiedener Modelle und bringt die Grundidee des klassischen Ansatzes gut auf den Punkt.

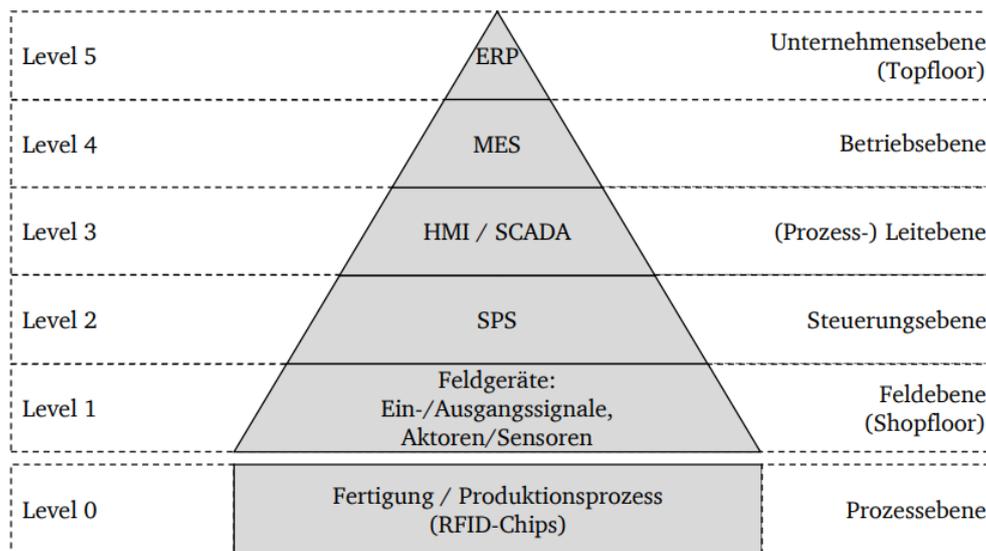


Abbildung 8: *Klassische Automatisierungspyramide nach Siepmann [31]*

Unter Vernachlässigung der Ebene Level 0, welche oft nicht explizit angeführt wird, beschäftigt sich diese Arbeit in erster Linie mit der untersten Ebene der Automatisierungspyramide, der sogenannten Feldebene. Die Abgrenzung zu anderen Ebenen wie der Steuerungsebene, bzw. Leitebene ist wichtig für das Verständnis und die Abgrenzung der Aufgabenstellung.

Nach H.-J. Gevatter und U. Grünhaupt [30] enthält die **Feldebene** alle prozessnahen Komponenten und Aufgaben wie Messfühler (Sensoren) und Stellgeräte (Aktoren). Daraus folgernd liegt die Aufgabe der Datenerfassung aller relevanten Informationen, also der Messungen, in der Feldebene. Die Weiterverarbeitung und Nutzung der Daten erfolgt teilweise in der Feldebene, allerdings auch in den darüberliegenden Steuer- und Leitebenen [32].

3.2 Sensorik

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit verschiedenen Sensoren, welche zur Temperatur-, Druck-, Durchfluss- und Füllstandmessung im SETE-Prozess verwendet werden können. Es gibt unterschiedliche Methoden, die physikalische Messgröße in ein elektrisches Messsignal umzuwandeln. Dementsprechend bietet jeder Sensortyp verschiedene Vor- als auch Nachteile. Um eine fundierte Auswahl des Messgerätes und des Messkonzeptes treffen zu können, siehe Kapitel 5, soll hier ein Überblick über ausgewählte Möglichkeiten sowie eine physikalische Grundlage für einen Vergleich dieser geschaffen werden. Die Auflistung hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Grundsätzlich wird auf die bei ähnlichen Prozessen am häufigsten verwendeten Sensoren eingegangen.

Die Sensoren, welche dem Aufnehmer in Abbildung 7 in der Messkette entsprechen, sind wie beschrieben dazu da, die Messgröße in ein elektrisches Signal umzuwandeln. Nach Kapitel 3.1.1 wird dieses Messsignal vom Sensor kommend mittels eines Messumformers weiterverarbeitet, verstärkt und anschließend mittels eines Transmitters zu einem normierten Ausgangssignal, z.B. 4 bis 20 mA, weiterverarbeitet. Die Begriffe Sensor, Messumformer und Transmitter werden häufig als Synonym verwendet und unterliegen in verschiedenen Literaturquellen unterschiedlichen Definitionen [33]. Um hier Missverständnisse zu vermeiden, ist bei der Auswahl der Messgeräte besonders auf das gewünschte Ausgangssignal zu achten. In den folgenden Kapiteln spielen die Messsignalverarbeitung sowie der genaue Wert des Ausgangssignals jedoch eine untergeordnete Rolle. Der Fokus liegt auf den physikalischen Eigenschaften der eigentlichen Sensoren, den Messwertaufnehmern.

Grundsätzlich müssen sämtliche nachfolgend beschriebenen Messgeräte vor der eigentlichen Messung auf die genauen Messbedingungen kalibriert werden. Diese Kalibrierung ist für die spätere Verwendung der Messwerte sowie für einfache Änderungen an den Messgeräten eine Grundvoraussetzung [34].

3.2.1 Temperaturmessung

„Die Temperatur ist als ein Maß für die statistisch gemittelte Geschwindigkeit und damit die kinetische Energie der Moleküle eines Körpers anzusehen“, so interpretiert ABB Automation Products GmbH [35] eine der sieben Basisgrößen des Internationalen Einheitensystem (SI). Die Erfassung dieser fundamentalen physikalischen Größe gehört zu den grundlegenden Aufgaben beinahe jeder messtechnischen Fragestellung. Eine direkte Messung der Temperatur, wie in Kapitel 3.1.2 definiert, ist nicht möglich [36]. Daher erfolgt die Temperaturmessung in der Praxis indirekt.

Beim bekanntesten Thermometer, dem Ausdehnungsthermometer, beruht die Temperaturmessung auf dem Prinzip des Temperaturlausgleichs. Dieser beschreibt den Angleich der Temperatur des Thermometers an die Temperatur des Messobjektes bzw. des Messmediums nach unendlich langer Zeit. Dies bedeutet zwar, dass ein vollständiger Ausgleich der Temperatur in der Realität nie erfolgt, allerdings erreicht die Messung abhängig von der jeweiligen Ansprechzeit des Thermometers in einer gewissen Zeitspanne die für die Messgenauigkeit erforderliche Temperatur [37]. Das beschriebene Ausdehnungsthermometer, auf das in weiterer Folge nicht mehr näher eingegangen wird, ist ein sogenanntes Berührungsthermometer. Der Großteil aller Methoden zur Temperaturmessung im hier interessanten Messbereich lassen sich in diese Klasse der Berührungsthermometer sowie der Strahlungsthermometer einordnen. Nachfolgend wird ein Überblick über zwei für diese Arbeit relevante Temperatursensoren mit elektrischen Ausgangssignalen und deren Funktionsprinzip sowie Eigenschaften, gegeben. Diese Sensoren basieren auf der thermoelektrischen Temperaturmessung, welche sich spezielle temperaturabhängige Eigenschaften bestimmter Materialien zu Nutze machen. Die Auflistung hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Sie dient als technische Verständnisgrundlage für die in späteren Kapiteln beschriebenen Sensoren. Dabei wird auf die bei ähnlichen Prozessen am häufigsten verwendeten Sensoren eingegangen. Strahlungsthermometer und andere spezielle Temperaturfühler werden in dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt, auch wenn diese theoretisch für die Messaufgabe geeignet wären.

Widerstandsthermometer

Eine Möglichkeit der Temperaturmessung ist, die Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit σ zur Bestimmung zu verwenden. Die elektrische Leitfähigkeit σ ist umgekehrt proportional zum spezifischen Widerstand ρ , siehe Gleichung (4) [38].

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (4)$$

Widerstandsthermometer werden auch als resistive Temperatursensoren bezeichnet und basieren auf der Abhängigkeit des spezifischen Widerstandes von der Temperatur, welcher im Allgemeinen wie in Gleichung (5) dargestellt werden kann [38]. α und β sind hierbei materialabhängige Koeffizienten, die die realen Abhängigkeiten definieren. Hierbei ist zu beachten, dass die beiden Werte temperaturabhängig sind. Um eine systematische Messabweichung zu vermeiden, sollten deshalb jeweils mittlere Temperaturkoeffizienten für den gewünschten Messbereich verwendet werden [26]. $\rho(0)$ und $\rho(T)$ sind die spezifischen Widerstände bei den Bezugstemperaturen 0 und T [38].

$$\rho(T) = \rho(0) \cdot [1 + \alpha T + \beta T^2 + \dots] \quad (5)$$

Die Debye-Temperatur ist ein Maß für jene Temperatur, unterhalb derer Freiheitsgrade "einfrieren". Bei Temperaturen oberhalb der Debye-Temperatur werden in weiterer Folge alle Schwingungsmodi angeregt [39]. In guter Näherung gilt in Metallen für Zustände mit Temperaturen größer dieser Debye-Temperatur Gleichung (6), womit eine Temperaturmessung über die Messung des spezifischen Widerstandes ρ relativ einfach möglich ist [38].

$$\rho \sim T \quad (6)$$

Es gibt Widerstandsthermometer sowohl mit Metall- als auch mit Halbleiter-Messwiderständen. Obwohl beide Messverfahren auf der temperaturabhängigen Änderung des Materialwiderstandes basieren, unterscheiden sich deren Eigenschaften teils grundlegend.

Metallwiderstandssensoren aus Kupfer, Nickel, Wolfram oder Platin besitzen nach H.-R. Tränkle und L.M. Reindl [38] im Temperaturbereich zwischen -70 und 250°C eine nahezu lineare Abhängigkeit zwischen Widerstand und Temperatur. Der Temperaturkoeffizient von Metallen ist stets positiv, was bedeutet, dass sich deren Widerstand mit steigender Temperatur erhöht [37]. Dafür sind in erster Linie die mit der Temperatur steigenden Wechselwirkungen zwischen den Elektronen und den Gitterschwingungen verantwortlich [38]. Metalle sind daher sogenannte Kaltleiter. Heutzutage wird fast ausschließlich Platin als Sensormaterial verwendet, da es einen sehr großen Temperaturkoeffizienten und gleichzeitig eine hohe thermische und mechanische Stabilität aufweist [30]. Dabei sind speziell die Fühler PT100 und PT1000 zu nennen, wobei die jeweiligen Zahlen 100 und 1000 für den Widerstand des Fühlers in Ohm bei 0°C stehen.

Widerstandsthermometer unterliegen einer genormten Einteilung in Genauigkeitsklassen. Diese Klassen sind in Tabelle 2 angeführt.

Tabelle 2: *Genauigkeitsklassen für Widerstandsthermometer nach ÖNORM EN 60751 [40]*

Klasse	Gültigkeitsbereich / $^{\circ}\text{C}$		Grenzabweichung ¹ / $^{\circ}\text{C}$
	Drahtgewickelte Widerstände	Schichtwiderstände	
AA	-50 bis +250	0 bis +150	$\pm (0,1 + 0,0017 t)$
A	-100 bis +450	-30 bis +300	$\pm (0,15 + 0,002 t)$
B	-196 bis +600	-50 bis +500	$\pm (0,3 + 0,005 t)$
C	-196 bis +600	-50 bis +600	$\pm (0,6 + 0,01 t)$

Im Gegensatz zu den Metallwiderstandssensoren, die Kaltleiter sind, gibt es auch die sogenannten Heißeiter, bei denen oftmals ein Halbleiter als Material für den Widerstandssensor dient. Diese **Halbleiterwiderstandssensoren** mit negativem Temperaturkoeffizient, deren Widerstand sich also mit steigender Temperatur verringert, werden auch NTC-Thermistoren genannt (negative temperature coefficient) [37]. Die Ursache für die Verringerung des Widerstandes bei steigender Temperatur liegt in der Struktur des oft gesinterten Materials, wobei sich hier aufgrund von Korngrenzen eine durch steigende Temperatur entstehende Leitfähigkeit ausbildet [38]. Messwiderstände für Kaltleiter, welche beispielsweise aus Sinterkeramiken (z.B. BaTiO_3) bestehen, werden demgegenüber als PTC-Thermistoren (positive temperature coefficient) bezeichnet [30]. Diese Fühler aus halbleitenden Keramikmaterialien weisen im Gegensatz zu den Metallwiderstandssensoren häufig stark nichtlineare Kennlinien auf. Der Vorteil dieser Materialien liegt in einer sehr hohen Empfindlichkeit in schmalen Temperaturbereichen, was deren oftmalige Anwendung als Grenzwertüberwachungssensor erklärt [30]. Die Genauigkeit ist jedoch weitaus geringer als bei klassischen Platinsensoren [38]. Halbleitersensoren sind jedoch kostengünstiger als metallische Temperatursensoren [41].

¹ $|t|$ = Absolutbetrag der Temperatur in $^{\circ}\text{C}$

Das dynamische Ansprechverhalten von Widerstandssensoren ist wie bei allen Berührungsthermometern aufgrund der theoretisch unendlich langen Zeit bis zum Temperaturengleich ein nicht zu vernachlässigendes Thema. Die Übergangszeiten von Widerstandssensoren sind jedoch um 10 - 25 % größer als bei vergleichbar aufgebauten Thermoelementen. Um dieses Ansprechverhalten und die Messgenauigkeit zu erhöhen, ist eine ausreichende thermische Kopplung des Sensors an das Messmedium notwendig. Ein weiterer maßgebender Punkt für die Messgenauigkeit der Widerstandssensoren ist die Notwendigkeit eines elektrischen Messstroms zur Messung eines Widerstandes. Dieser Messstrom führt zu einer Erwärmung des Messobjektes und dadurch zum sogenannten Erwärmungsfehler. Zur Beurteilung dieses Fehlers dient der Eigenerwärmungskoeffizient E_K , welcher unter anderem von der umgesetzten Leistung, dem Messmedium und dem Thermometermaterial abhängt. Ebenfalls zu beachten sind parasitäre Thermospannungen, welche an allen Kontaktstellen unterschiedlicher Leiter-Werkstoffe entstehen und die Widerstandsmessung verfälschen. Dies lässt sich durch die Messung mittels Wechselstroms oder durch große Messströme weitgehend verhindern. Letztere führen wiederum zu einer hohen Eigenerwärmung. Die Widerstände der Messleitungen im Falle einer Zweileiter-Messschaltung haben ebenfalls Einfluss auf die Messgenauigkeit. Um diesen zusätzlich auftretenden Leitungswiderstand teilweise bzw. beinahe vollständig zu kompensieren, werden Drei- bzw. Vierleiter-Messschaltungen verwendet [30]. So eine Vierleiter-Messschaltung ist in Abbildung 9 abgebildet.

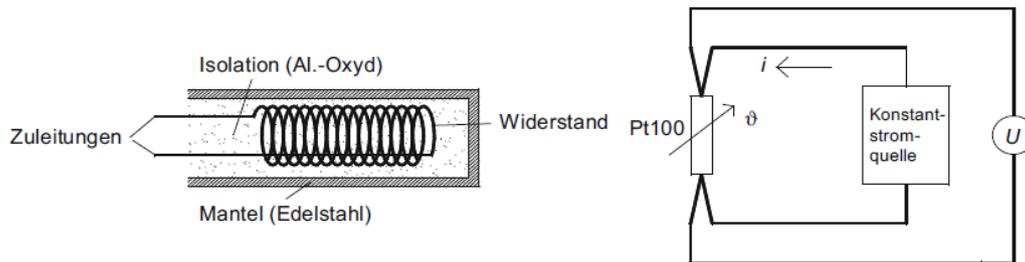


Abbildung 9: Aufbau eines ummantelten PT100 Messwiderstandes und Schema einer Vierleiter-Messschaltung [37]

Zusammengefasst sind die wichtigsten Vor- und Nachteile von Widerstandsthermometern [41]:

- Vorteile:
 - gute Vibrationsfestigkeit (ausgenommen Keramikwiderstände)
 - Langzeitstabilität
 - hohe Robustheit
 - hohe Genauigkeit
- Nachteile:
 - größere Zeitkonstante als bei vergleichbaren Thermoelementen
 - begrenzter maximaler Messbereich
 - teurer als Thermoelemente

Thermoelement

Eine zweite Möglichkeit der indirekten Temperaturmessung unter Ausnutzung eines physikalischen Effektes ist die Messung mit einem sogenannten Thermoelement. Diese sehr präzisen und über einen weiten Temperaturbereich anwendbaren Sensoren basieren auf dem Thermoeffekt, welcher auch nach seinem Entdecker, Seebeck-Effekt genannt wird. Der Seebeck-Effekt beschreibt die Tatsache, dass sich freie Ladungsträger (Elektronen) inhomogen in einem ungleichmäßig erwärmten Material verteilen. Am kalten Ende des Materials sammeln sich die Elektronen, während am heißen Ende eine Verarmung an Elektronen stattfindet. Es entsteht eine Potentialdifferenz innerhalb dieses Materials. Messbar wird diese Potentialdifferenz, auch Thermospannung U_T genannt, indem ein zweiter Leiter aus einem anderen Material innig an zwei Stellen mit dem ersten Leiter verbunden wird [35]. Diese Verbindung wird Thermopaar genannt und ist in Abbildung 10 dargestellt.

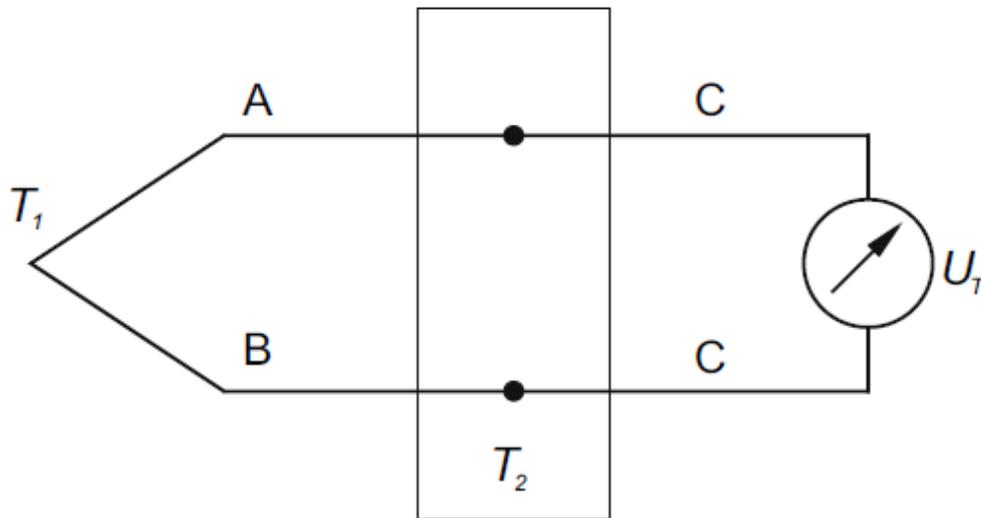


Abbildung 10: Schematische Darstellung eines Thermopaars [30]

Diese Thermospannung U_T ist proportional zur Temperaturdifferenz zwischen der Temperatur T_1 und T_2 sowie zum temperaturabhängigen Seebeck-Koeffizient S . Die Thermospannung U_T berechnet sich nach Gleichung (7). Diese Berechnung kann dann angewandt werden, wenn die verwendeten Materialien thermoelektrisch homogen sind. Die Temperaturmessstelle T_1 wird der zu messenden Temperatur ausgesetzt und mit der sogenannten Vergleichsstellentemperatur T_2 verglichen.

$$U_T = \int_{T_1}^{T_2} S(T) dT \quad (7)$$

Meistens wird die Thermospannung eines Thermopaars gegen ein Referenzmaterial angegeben. Dieses Referenzmaterial ist häufig Platin. Dadurch entsteht in Analogie zur elektrochemischen Spannungsreihe eine thermoelektrische Spannungsreihe. Je nach Materialpaarung ergibt sich eine eigene Kennlinie mit charakteristischer Steigung, siehe Abbildung 11. Die Wahl des verwendeten Thermopaars hängt vom zu messenden Tempe-

3 Grundlagen zur Mess- und Regelungstechnik

raturniveau sowie von der notwendigen Empfindlichkeit der Messung ab. Von den unzähligen Kombinationsmöglichkeiten haben sich in der Praxis nur wenige durchgesetzt. Grob lassen sich Thermoelemente abhängig von ihren Materialien in zwei Hauptgruppen einteilen: Die Edelmetall-Thermopaare (Typ S, R und B) sowie die Unedelmetall-Thermopaaren (Typ E, J, K, N und T) [35][42].

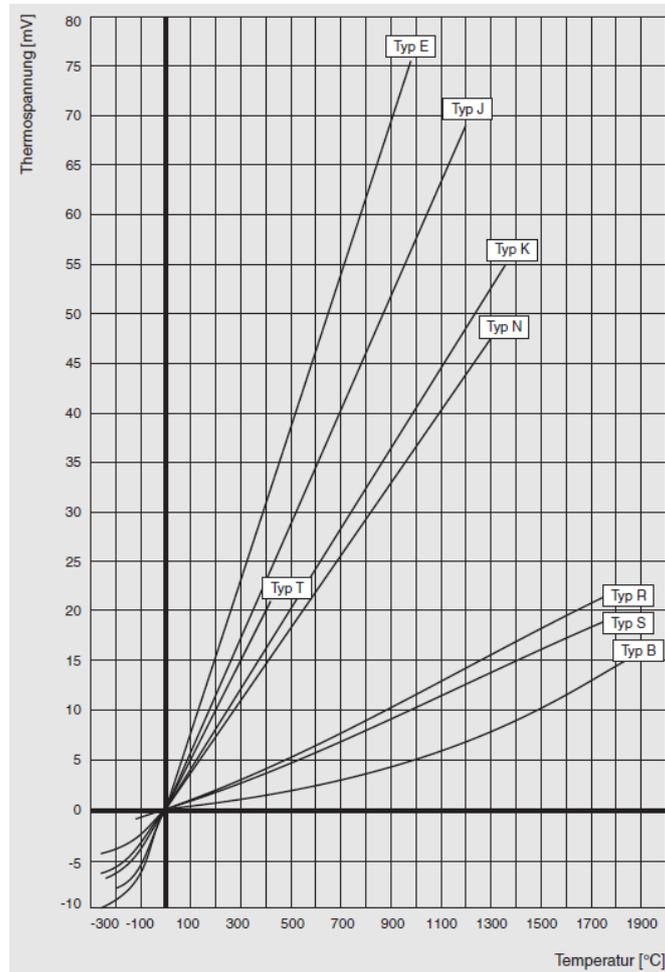


Abbildung 11: Grundwertdiagramm für Thermopaare nach EN 60584 [35][42]

Ähnlich zu den Genauigkeitsklassen bei Widerstandsthermometern, siehe Tabelle 2, unterliegen auch Thermoelemente einer genauen Einteilung in Klassen abhängig von deren Grenzabweichung. Diese Genauigkeitsklassen unterscheiden sich jedoch in Abhängigkeit vom Typ des Thermopaars und sind in der ÖNORM EN 60584 [42] genau definiert. Es gibt eine Vielzahl an Bauarten von Thermoelementen, die alle das Ziel haben, den Sensor ideal an die Messbedingungen anzupassen. Prinzipiell unterscheidet man jedoch zwei Ausführungen von Thermoelementen: die ummantelten und die nicht ummantelten oder losen Thermoelementen. Vor allem die ummantelten Thermoelemente werden häufig in der industriellen Messtechnik eingesetzt, da durch den Mantel ein guter mechanischer Schutz gewährleistet ist und Einflüsse der Messumwelt die Messung weniger stark beeinflussen als bei losen Thermoelementen [30].

Durch eine gute thermische Kopplung wird dafür gesorgt, dass beide Anschlussklemmen, siehe Abbildung 10, dieselbe Vergleichstemperatur T_2 aufweisen. Wie in Gleichung (7) ersichtlich, geht diese Vergleichstemperatur T_2 direkt in das Messergebnis der Thermospannung U_T ein. Um ein brauchbares Messergebnis der Temperatur T_1 zu erzielen, muss die Temperatur T_2 konstant gehalten werden, was nicht immer ganz einfach ist. Man spricht vom sogenannten Vergleichsstellenproblem. Dieses Problem kann entweder dadurch gelöst werden, dass die Vergleichstemperatur durch zusätzliche Thermostate konstant gehalten wird, oder indem man mithilfe einer temperaturempfindlichen Brückenschaltung eine Korrekturspannung erzeugt, die bei Abweichung der Vergleichstemperatur vom Sollwert eine den Fehler kompensierende Spannung erzeugt [26]. Weitere Fehlerquellen bei der Temperaturmessung mit Thermoelementen sind, wie auch schon im Kapitel der Widerstandsthermometer beschrieben, parasitäre Thermospannungen, welche die gemessene Thermospannung verfälschen. Inhomogenitäten der Thermoedrähte und elektrostatische sowie elektromagnetische Einflüsse auf die Drähte sind ebenfalls häufige Ursachen für Messunsicherheiten.

Bei der Auswahl des richtigen Thermoelements ist auf die Anforderungen der Messung speziell im Hinblick auf Genauigkeit und Ansprechzeit zu achten. Die Ansprechzeit der Thermoelemente ist direkt abhängig von deren Masse. Bei Messungen in Flüssigkeiten mit einer hohen Strömungsgeschwindigkeit kann ein Fühler großer Masse verwendet werden, während bei den Messungen in langsam strömenden Gasen eine deutlich kleinere Masse des Thermoelements notwendig ist, um ähnliche Ansprechzeiten zu gewährleisten [37]. Die wesentlichsten Vor- und Nachteile von Thermoelementen sind [41]:

- Vorteile:
 - sehr großer Messbereich
 - schnelle Ansprechzeiten
 - hohe Robustheit
 - kostengünstiger als Widerstandsthermometer
 - Langzeitstabilität
- Nachteile:
 - Genauigkeit geringer als bei Widerstandsthermometern

3.2.2 Druckmessung

Nach der Temperatur ist der Druck die am zweithäufigsten gemessene physikalische Größe in industriellen Prozessen [30]. Arbeitsstoffe üben unabhängig von ihrem Aggregatzustand ständig einen Druck auf die sie umgebenden Materialien aus. Ebenso sind viele der physikalischen Eigenschaften der Stoffe direkt oder indirekt druckabhängig. Die Erfassung und Überwachung des Druckes ist daher eine wichtige Informationsquelle, um den jeweiligen Zustand in Prozessen vollständig beschreiben zu können. Druck ist definiert als die Kraft, die senkrecht auf eine bestimmte Fläche wirkt. Bei der technischen Angabe von Drücken unterscheidet man verschiedene Druckarten [34]:

- **Absolutdruck** p_{abs} ist der Druck gegenüber eines Referenzdruckes von 0 bar (Vakuum)

- **Überdruck** p_e ist der Druck gegenüber des Atmosphärendruckes p_{amb} als Referenzdruck
- **Differenzdruck** Δp_{1-2} ist die Druckdifferenz zwischen zwei Drücken

Die genaue Definition der für die Messaufgabe in Betracht zu ziehenden Druckart ist maßgeblich, damit der passende Drucksensor ausgewählt werden kann. Die Angabe der Einheit allein ist hier zu wenig, da alle Druckarten Bar/bzw. Pascal als Einheit haben. Die Druckangaben für die Druck-Messtechnik müssen also klar einer der genannten Druckarten zugeordnet werden können. Zusätzlich ist bei den Angaben auf Bauteilen in der Messtechnik die weitere Unterscheidung in den **maximal zulässigen Druck** p_S , den **Prüfdruck** p_T und den **Arbeitsdruck** p_O wichtig. p_S steht für den höchsten Druck, für den das Gerät laut Hersteller ausgelegt ist, p_T für den Überdruck, mit dem das Bauteil geprüft wurde und p_O für den Druck, der bei genau definierten Betriebsbedingungen der Anlage auftritt [34].

Die Druckmessung erfolgt wie auch die Temperaturmessung durch eine indirekte Messung. Durch die Beobachtung und Feststellung der Veränderung von druckabhängigen Eigenschaften wie Volumen, Form, Widerstand oder Ähnliches kann der Druck bestimmt werden. Einfache Druckmessungen sind etwa durch U-Rohr-Manometer oder Federmesswerke möglich. In diesem Kapitel liegt der Fokus jedoch auf den elektromechanischen Druckaufnehmern, welche ein passendes druckproportionales elektrisches Messsignal ausgeben können. Oftmals sitzt der Druckaufnehmer in einer sogenannten Messzelle, welche in unterschiedlichsten Ausführungsformen existiert. Die Messzelle kann, muss jedoch nicht direkt mit dem zu messenden Medium verbunden sein. Es können Druckfühler - im einfachsten Fall mit Flüssigkeit gefüllte Kapillarrohre - als Trennsysteme zwischen geschaltet sein. Abhängig davon, ob eine Über-, Absolut- oder Differenzdruckmessung stattfinden soll, wird der Messzelle zusätzlich der jeweilige Referenzdruck zugeführt [34]. Elektromechanische Drucksensoren basieren auf der druckabhängigen Verformung einer Membran bzw. eines drucksensitiven Membranelements bei einseitiger Druckbelastung. Dabei wird entweder die mechanische Verformung oder das durch die Verformung entstehende elektrische Signal als Grundlage für die Messung des Druckes verwendet [36]. Folgend wird auf drei Wandlerprinzipien eingegangen: das schon lange bekannte und bewährte Prinzip der Druckmessung durch Dehnungs-Messstreifen (DMS), sowie die Technologien der piezoresistiven und kapazitiven Druckmessung.

Drucksensor mit Dehnungs-Messstreifen (DMS)

Es gibt unzählige Ausführungen der Technologie der DMS, welche sich in Bauweise, Material oder Messaufbau unterscheiden. Das zugrundeliegende Funktionsprinzip ist jedoch bei all diesen Ausführungen ähnlich. Die Umwandlung der Messgröße Druck in ein elektrisches Signal erfolgt indirekt. Der beim Sensor anliegende Druck verformt je nach dessen Wert eine Membran in die eine oder andere Richtung und wird so in eine Oberflächendehnung der Membran umgewandelt. An der Oberfläche der Membran entstehen so sowohl Gebiete, die gestaucht als auch welche die gedehnt werden. Diese Oberfläche ist an bestimmten charakteristischen Punkten mit DMS versehen (Stellen der größten Dehnung bzw. Stauchung). Um die gewünschte Funktion gewährleisten zu können, ist es wichtig, dass die Verbindung zwischen DMS und Messkörper/Messmembran

kraftschlüssig erfolgt [38]. Dieser grundlegende konstruktive Aufbau kann wie in Abbildung 12 dargestellt aussehen.

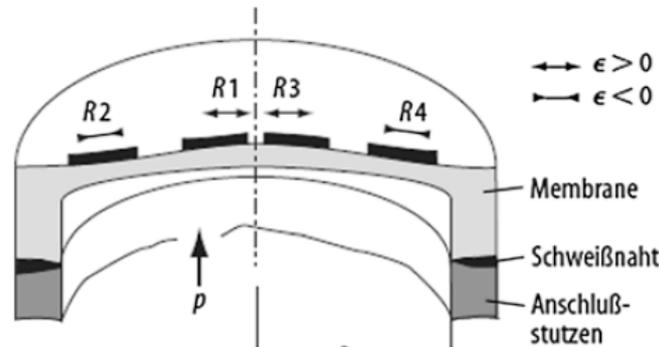


Abbildung 12: *Prinzipschichtdarstellung einer Plattenfedermembran mit an der Oberfläche angebrachten DMS*[38]

Dabei stehen die Widerstände R_{1-4} für die DMS, welche teilweise gestreckt und teilweise gestaucht werden. Ob eine Stauchung oder Streckung vorliegt, wird durch die Oberflächendehnung ϵ bestimmt. Diese entspricht der Längenänderung Δl der Oberfläche geteilt durch dessen Länge l im ungedehnten Zustand [38].

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (8)$$

Die an der Oberfläche angebrachten DMS wandeln diese druckproportionale Dehnung ϵ in eine Widerstandsänderung ΔR um. Die maximale Widerstandsänderung beträgt bei DMS jedoch nur einige Promille des Ausgangswertes und ist neben der Dehnung auch von parasitär auftretenden Temperaturänderungen abhängig. Durch die Verschaltung der DMS in einer Wheatstoneschen Messbrücke kann diese Widerstandsänderung ΔR in eine proportionale Spannungsänderung ΔU umgewandelt werden. Im Allgemeinen ist der Zusammenhang zwischen der auftretenden Widerstandsänderung ΔR und der Dehnung ϵ nicht einfach zu beschreiben und in erster Linie vom gewählten Material der DMS abhängig. Bei metallischen DMS ist dieser Zusammenhang leichter beschreibbar und daher einfacher zu handhaben als beispielsweise bei Halbleiter-DMS, welche erhebliche Nichtlinearitäten aufweisen [38]. Es haben sich sowohl Metallfolien-DMS als auch die neuere Technologie der Dünnschicht-DMS in der Industrie durchgesetzt.

Um parasitäre Widerstandsänderungen durch Temperaturänderungen gering zu halten, ist darauf zu achten, dass die Druck-Messzelle gut von Umwelteinflüssen abgeschirmt ist. Häufig findet im Drucksensor zusätzlich eine Temperaturmessung statt, um mithilfe der Messumformerelektronik die Temperatureinflüsse kompensieren zu können [34].

Zusammengefasst die wichtigsten Vor- und Nachteile von DMS (sowohl von Folien- als auch Dünnschicht DMS) [38]:

- Vorteile:
 - hohe Messgenauigkeit
 - Einsatz bei hohen Temperaturen möglich (Dünnschicht DMS)

- gute Langzeitstabilität
- hohe Robustheit (speziell Folien-DMS) gegen Vibrationen/Rütteln
- Nachteile:
 - relativ teuer
 - eingeschränkte Temperaturbeständigkeit (Folien-DMS)

Drucksensor mit piezoresistivem Abgriffsystem

Piezoresistive Drucksensoren funktionieren ähnlich wie Drucksensoren mit DMS. Sie nutzen ebenfalls die druckabhängige Dehnung einer Membran und in weiterer Folge die Dehnungsabhängigkeit der Leitfähigkeit eines Materials. Der größte Unterschied liegt dabei darin, dass statt Metall-DMS Halbleitermaterialien wie Silizium verwendet werden. Bei diesen Materialien basiert die Änderung der Leitfähigkeit auf der energetischen Umverteilung der beweglichen Ladungsträger sowie der Veränderung deren Beweglichkeit [38]. Die Dicke, sowie der Durchmesser der Silizium-Messmembran ist ein wichtiger Parameter, um den gewünschten Messbereich des Drucksensors einzustellen. Auf dieser Silizium-Membran befinden sich meist mindestens vier Piezowiderstände, die mittels einer Brückenschaltung verbunden werden. In Analogie zum Aufbau der Drucksensoren mit DMS befinden sich zwei dieser Widerstände in Regionen der Membran, wo sich ihr Wert bei Beanspruchung vergrößert, während die anderen zwei so angeordnet sind, dass sich deren Wert verkleinert. Die Messumformerelektronik wandelt diese Widerstandsänderung abermals in ein druckproportionales elektrisches Ausgangssignal um [34].

Zeit- und temperaturabhängige Hysteresen der Messkennlinie, sowie zeit- und temperaturabhängige Drifts und Offsetspannungen der piezoresistiven Drucksensoren sind die wichtigsten hierbei zu betrachtenden Themen. Diese Themen werden durch den richtigen Aufbau des Drucksensors, bestimmte Verbindungstechniken innerhalb des Drucksensors sowie durch elektronische Kompensationsrechnungen berücksichtigt. Im Vergleich mit den nachfolgend beschriebenen kapazitiven Drucksensoren sind die piezoresistiven Drucksensoren für höhere Nenndruckbereiche (100 kPa bis 50 MPa) anwendbar, was einen der häufigsten Auswahlgründe darstellt.

Weitere Vor- und Nachteile im Vergleich mit den beiden anderen genannten Drucksensoren, laut H.-R. Tränkler und L. M. Reindl [38], sind nachfolgend aufgelistet.

- Vorteile:
 - mittlere bis hohe Genauigkeit
 - großer möglicher Druckmessbereich
 - kostengünstig
 - starke Ausgangssignale
- Nachteile:
 - häufig ist eine Medientrennung erforderlich
 - eingeschränkter Temperaturbereich
 - ungeeignet für sehr kleine Druckbereiche (< 10 kPa)

Wichtig ist die Unterscheidung zwischen piezoresistiven Drucksensoren und piezoelektrischen Sensoren. Diese zweitgenannten Sensoren basieren nicht auf der dehnungsabhängigen Änderung des Widerstandes, sondern auf dem longitudinalen oder transversalen piezoelektrischen Effekt von zum Beispiel Quarzen [38].

Drucksensor mit kapazitivem Abgriffsystem

Diese Drucksensoren wandeln die druckbedingte Bewegung einer Membran in eine Änderung der Kapazität um. Dies kann abermals durch verschiedenste Messaufbauten und Materialien erfolgen. Die Funktion basiert jedoch im Prinzip darauf, dass sowohl eine bewegliche Membran als auch eine feste Gegenscheibe an bestimmten Stellen mit Metallen beschichtet sind und dadurch ein Plattenkondensator gebildet wird. Die beiden Flächen sind wie bei einem Kondensator üblich durch eine Isolierschicht voneinander getrennt, um Kurzschlüsse zu vermeiden. Verändert sich nun durch den Einfluss des zu messenden Druckes der Abstand zwischen diesen beiden Metallschichten, verändert sich in weiterer Folge die Kapazität des Kondensators. Wie in Abbildung 13 dargestellt, bildet sich in vielen Bauformen nicht nur ein Plattenkondensator, sondern durch Aufteilung der Metallbeschichtungen in zwei Ringe zwei Kondensatoren. Nur der Kondensator C_p unterliegt der druckabhängigen Abstandsänderung. Der zweite Kondensator C_{ref} dient als Referenzkondensator und bleibt unverändert [34]. Die vom Kondensator C_p gemessene druckproportionale Kapazitätsänderung wird mithilfe der Messumformerelektronik in das gewünschte analoge oder digitale Ausgangssignal umgewandelt. Im einfachsten Fall geschieht dies über eine sogenannte Viertel-Messbrücke, was jedoch einige Schwierigkeiten mit der Linearisierung nach sich zieht und mittlerweile großteils von anderen Schaltungskonzepten abgelöst wurde [38]. Während der Zusammenhang der Durchbiegung der Membran in Abhängigkeit vom Druck sehr linear ist, ist die Veränderung der Messkapazität C_p nichtlinear [30].

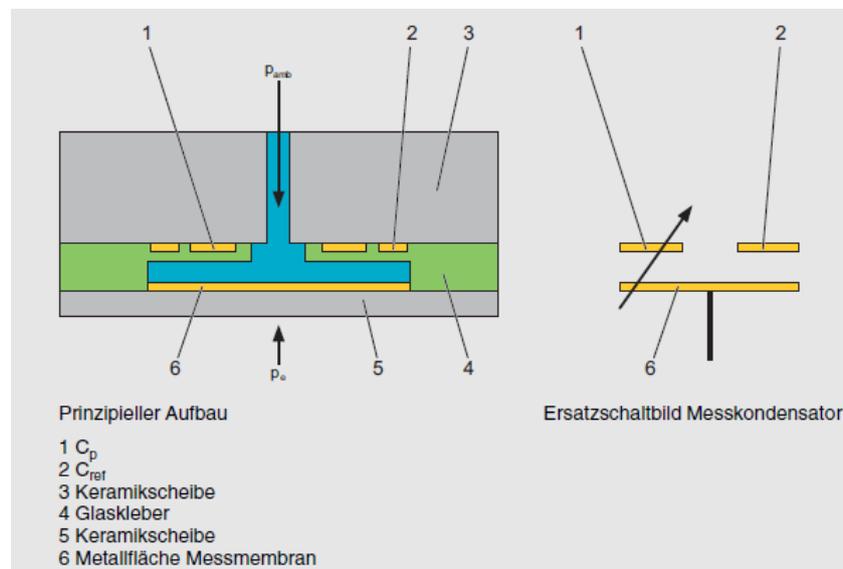


Abbildung 13: Prinzipielle Darstellung des Aufbaus eines Drucksensors mit kapazitivem Abgriffsystem [34]

Die Membranmaterialien beeinflussen die Eigenschaften des Drucksensors. In der Vergangenheit haben sich besonders metallische Membranen und Keramikmembranen durchgesetzt. Momentan erobern insbesondere auch kapazitive Siliziumsensoren den Markt [38].

Ebenso wie die Drucksensoren mit DMS unterliegen auch die kapazitiven Drucksensoren einer Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur. Hier muss abermals auf eine gute Trennung von diesen externen Einflüssen geachtet werden. Eine Temperaturmessung direkt am Drucksensor und die daraus folgende Kompensation des Temperatureinflusses kann die Messgenauigkeit erhöhen [34]. Die Kapazitätswerte der Kondensatoren bewegen sich in einem sehr kleinen Wertebereich von einigen fF bis pF. Die druckabhängige relative Kapazitätsänderung ist im Vergleich dazu sehr groß und kann bis zu 50 % der Ausgangskapazität erreichen. Durch die sehr kleinen Kapazitäten ist die Messgenauigkeit von solchen Drucksensoren stark von parasitären Kapazitäten abhängig.

Verallgemeinert und im Vergleich zu den zuvor besprochenen piezoresistiven Sensoren ist die Empfindlichkeit der kapazitiven Drucksensoren durchwegs höher. Daher werden kapazitive Drucksensoren in erster Linie für niedrige Druckbereiche verwendet [38].

Trotz verschiedenster Bauformen und Charakteristika nachfolgend eine Verallgemeinerung der Vor- und Nachteile von Drucksensoren mit kapazitivem Abgriffsystem [38]:

- Vorteile:
 - geeignet für sehr niedrige Druckbereiche (< 100 kPa)
 - geringer Energieverbrauch
 - hohe Empfindlichkeit
 - gute Auflösung und Langzeitstabilität (im Vergleich zu piezoresistiven Drucksensoren)
 - unempfindlich gegenüber mechanischen Spannungen
- Nachteile:
 - Anfälligkeit gegenüber Störkapazitäten
 - ungeeignet für hohe Druckbereiche

3.2.3 Durchflussmessung

Der Durchfluss ist neben der Temperatur und dem Druck die dritte wichtige Messgröße, die bei Prozessen meist zu ermitteln ist. Unter Durchfluss versteht man den Volumen- bzw. Massenstrom eines Mediums, welcher in einem bestimmten Moment durch einen bestimmten Strömungsquerschnitt fließt [37]. Mit dem Begriff der Durchflussmessung kann sowohl die Messung des Massedurchflusses \dot{m} als auch des Volumendurchflusses \dot{V} gemeint sein. Diese Größen berechnen sich nach den Gleichungen (9) und (10). Die Messung des Massedurchflusses stellt hierbei oftmals die physikalisch gesehen idealere Methode dar, während in der Praxis meist der Volumendurchfluss aufgrund günstigerer Geräteeigenschaften bevorzugt wird [43].

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt} \quad (9)$$

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} = \frac{d(\rho V)}{dt} \quad (10)$$

In einem geschlossenen System ist der Massenstrom \dot{m} praktischerweise konstant, während der Volumenstrom von kompressiblen Fluiden aufgrund der Abhängigkeit der Dichte, und somit der Abhängigkeit von Druck und Temperatur, durch andere Größen beeinflusst wird [41]. Die Durchflussmessung hängt stark von den strömungstechnischen Eigenschaften des Fluids und der Strömung selbst ab. Hierbei sind vor allem zwei Begriffe zu nennen.

Die **Viskosität** ν oder Zähigkeit eines Fluids ist das Vermögen, gegen Formänderung eigenen Widerstand zu leisten. Grund dafür ist die innere Reibung des Fluids welche auf die entstehenden Kräfte zwischen den Molekülen des Fluids zurückzuführen ist. Die Viskosität ist daraus folgernd bei Flüssigkeiten und hohen Temperaturen deutlich höher als bei Gasen und niedrigen Temperaturen [43]. Meist wird die sogenannte kinematische Viskosität, oder auch dichtebezogene Viskosität bei Fluiden angegeben.

Die **Reynoldssche Zahl** Re ist eine wichtige Kennzahl von Strömungen. Sie ermöglicht Strömungen bei unterschiedlichen Bedingungen (geometrischen Verhältnissen, Dichte, Viskosität) miteinander zu vergleichen. Die Reynoldssche Zahl hängt vom Rohrdurchmesser d , von der kinematischen Viskosität ν und der mittleren Fließgeschwindigkeit im Rohr v ab. Durch die Reynoldssche Zahl lassen sich in weiterer Folge die beiden grundlegenden Strömungsarten der laminaren und turbulenten Strömung unterscheiden [43]. Dies ist deshalb maßgeblich, da die Art der Strömung in einem Rohr die notwendigen Messverfahren und die Genauigkeit der Durchflussmessung direkt beeinflussen.

Wie bei der Temperatur- und Druckmessung gibt es unzählige direkte und indirekte Durchflussmessverfahren. Allerdings kommen viele dieser technisch relevanten Verfahren für den SETE-Prozess nicht in Frage. Gründe dafür sind das hohe Druckniveau des Prozesses sowie die physikalischen Eigenschaften des Messstoffes CO_2 . Auf die genauen Gründe wird in Kapitel 5 eingegangen. Es folgt eine Vorauswahl und Beschreibung von Messverfahren, die am relevantesten erscheinen.

Ultraschall-Durchflussmesser

Die Schallgeschwindigkeit c in einem Medium ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schallwellen in diesem Medium. Sie ist stoffspezifisch und hängt von der Dichte (Druck und Temperatur) sowie geringfügig von der Frequenz des Signales ab [30]. Die Zeitdauer, die ein Signal benötigt, um von einem Punkt A zu einem anderen Punkt B zu gelangen, ist bei gleichbleibenden Bedingungen weitgehend konstant [26]. Bewegt sich nun das Medium, in dem sich der Schall ausbreitet infolge einer Strömung, überlagert diese Bewegungsgeschwindigkeit die Schallgeschwindigkeit. Diese Addition der Schallgeschwindigkeit im Medium mit der Geschwindigkeit des Mediums ist als Mitführungseffekt bekannt [43]. Werden nun zwei Ultraschall-Signale, einmal mit und einmal gegen die Strömungsrichtung des Mediums gesendet und die Laufzeit dieser Signale ausgewertet, stellt sich eine Laufzeitdifferenz zwischen den beiden Signalen ein. Aus dieser Laufzeitdifferenz kann man auf die mittlere Fließgeschwindigkeit des Mediums, und bei bekanntem Durchmesser der Rohrleitung auch auf dessen Volumendurchfluss schließen [41].

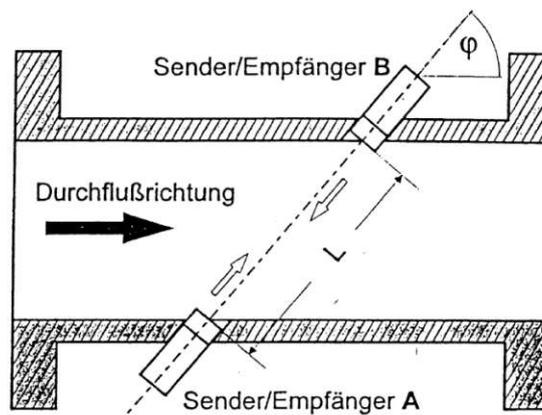


Abbildung 14: Ultraschall-Durchflussmessung nach dem Laufzeitverfahren [30]

Die Ultraschall-Durchflussmessung nach dem **Laufzeitverfahren** wird in Abbildung 14 veranschaulicht. Eine grundlegende Voraussetzung hierfür ist die gute akustische Transparenz des Messmediums. Weiters sollte das Messmedium wenig bis keine Festkörper oder Gasblasen enthalten [41].

Als zweites Verfahren, das auf der Verwendung von Ultraschall beruht, besitzt das **Doppler-Verfahren** einen deutlich kleineren Anwendungsbereich als das Laufzeitverfahren. Hierbei wird aus dem verpflichtenden Vorhandensein von Inhomogenitäten bzw. Verunreinigungen im Messmedium eine Frequenzverschiebung zwischen einem Referenzsignal und einem von den Verunreinigungen reflektiertem Signal bestimmt. Dies führt abermals zur mittleren Strömungsgeschwindigkeit des Mediums.

Neben der Unterscheidung in die beiden beschriebenen Messverfahren können auch noch zwei Ausführungsvarianten der Ultraschall-Durchflussmessgeräte unterschieden werden. Die Inline-Systeme, bei denen die Ultraschallwandler fest in der Rohrwand verbaut sind und mit dem Messmedium unmittelbar verbunden sind (siehe Abbildung 14), und die Clamp-on-Systeme, wo der Ultraschallwandler außen auf der Rohrwand aufsitzt. Beim Clamp-on-System muss der Schall die Rohrwand mit der Schallgeschwindigkeit des Rohrmaterials überwinden, bevor er das Medium durchdringen kann. Bei der Berechnung der mittleren Schallgeschwindigkeit und daraus dem Volumenstrom führt das prinzipiell zu keinen Problemen, jedoch müssen die Brechungs- und Reflexionsgesetze der Materialien speziell an der Grenzfläche zwischen Medium und Rohrwand bekannt sein. Bei Flüssigkeiten ist dieses Messverfahren gut einsetzbar. Fließt nun jedoch ein Gas durch das Rohr, kann der große Unterschied zwischen der Schallgeschwindigkeit des Gases und des Rohrmaterials zu Reflektionen des Signales und dadurch zu Problemen in der Messung führen. Auf die jeweiligen Gegebenheiten und Eigenschaften des Rohres und des Fluids ist also zu achten [41].

Das Ultraschall-Durchflussmessverfahren hat viele Vor-, aber auch Nachteile [41][38]:

- Vorteile:
 - hohe Langzeitstabilität
 - minimale Zeitkonstante

- kostengünstiger Aufbau
- geringer Druckverlust
- Nachteile:
 - starke Abhängigkeit vom Strömungsprofil
 - mäßige bis geringe Messgenauigkeit
 - empfindlich gegenüber Ablagerungen im Rohr

Magnetisch-induktive Durchflussmesser (MID)

Wenn eine Flüssigkeit ein nicht magnetisierbares Rohr durchströmt, welches selbst von einem Magnetfeld durchströmt wird, entsteht eine der Strömungsgeschwindigkeit proportionale Spannung. Bei konstanten und bekannten Rohr- und Strömungsparametern, wie dem Strömungsquerschnitt, kann so auf den Durchfluss geschlossen werden [26]. Beim magnetisch-induktiven Durchflussmesser wird das Faradaysche Induktionsgesetz angewandt, um einen Volumendurchfluss zu bestimmen. Das sich bewegende Medium, welches das Magnetfeld durchströmt, verhält sich wie ein bewegter elektrischer Leiter. Grundbedingung dafür ist eine elektrische Mindestleitfähigkeit des Mediums, welche abhängig von der Quelle und dem Hersteller zwischen 0,05 und 50 $\frac{\mu S}{cm}$ liegt [41][30][43].

Wie in Kapitel 5 näher beschrieben, ist diese Mindestleitfähigkeit der kritische Punkt an dem die Messung des Messmediums CO₂ scheitert. Für die Messung anderer Medien, in diesem Prozess vorkommend in den Sekundärkreisen, ist dieses Messverfahren eine realistische Möglichkeit mit folgenden Vor- und Nachteilen [41] [30].

- Vorteile:
 - extrem linearer Zusammenhang zwischen Strömungsgeschwindigkeit und Spannungsmessung
 - unabhängig von Prozessdruck und -temperatur
 - keine Druckverluste
 - hohe Langzeitstabilität
- Nachteile:
 - nur für elektrisch leitende Messmedien
 - beschränkte maximale Rohrnennweiten
 - empfindlich gegenüber leitenden Ablagerungen im Rohr

Coriolis-Massedurchflussmesser

Die Coriolis-Massedurchflussmessung basiert auf einem grundlegenden Prinzip der Mechanik - der Entstehung von Corioliskräften bei bewegten Massen. Der zugrundeliegende Corioliseffekt beschreibt die Tatsache, dass eine Masse m eine senkrecht zur Drehachse orientierte Krafteinwirkung F_c erfährt, wenn sich diese Masse mit der radialen Geschwindigkeit v in einem sich mit der Winkelgeschwindigkeit ω rotierenden Bezugssystem bewegt. Diese Trägheitskraft ist die sogenannte Corioliskraft und berechnet sich durch Gleichung (11) [38].

$$F_c = 2 \cdot m \cdot v \times \omega \quad (11)$$

Technisch nutzbar machen lässt sich dieser Effekt dadurch, dass sich ein vibrierendes Rohr, durch das eine Masse strömt, durch die auftretenden Corioliskräfte verbiegt und verdreht. Diese Verformung ist in Abbildung 15 ersichtlich. An den richtigen Stellen angeordnete elektrische Sensoren detektieren diese kleinen Messrohrverbiegungen, wobei die entstehende Phasendifferenz zwischen den Sensorsignalen proportional zum Massendurchfluss durch das Rohr ist [43]. Der Durchfluss eines Rohres wird mittels eines Coriolis-Massedurchflussmesser, anders als bei viele anderen Messverfahren also nicht durch die Messung des Volumenstromes, sondern durch die Bestimmung des Massenstromes bewerkstelligt. Neben der Phasendifferenz, die Aufschluss über den Massenstrom gibt, lässt sich über die Schwingfrequenz der Messrohre zudem auf die Dichte des Messmediums schließen. Genauer gesagt werden die vibrierenden Messrohre in Eigenresonanz betrieben, woraus sich die Gesamtmasse und in weiterer Folge die Dichte bestimmen lässt [30]. Da zur Kompensation von Temperatureffekten ebenfalls eine Temperaturmessung notwendig ist, lassen sich durch einen Coriolis-Massedurchflussmesser gleichzeitig drei physikalische Größe bestimmen: Massenstrom, Dichte und Temperatur [41].

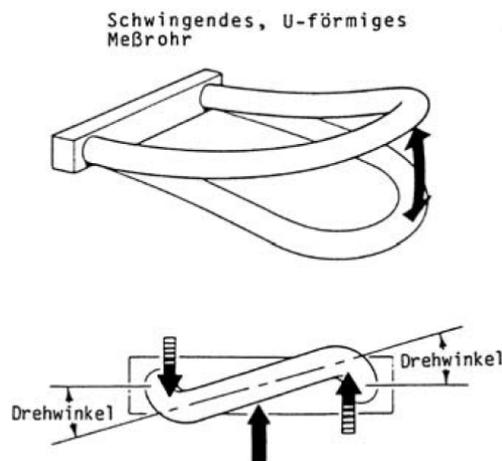


Abbildung 15: *Beispielhafte Darstellung der bei der Coriolis-Massedurchflussmessung auftretenden Verformung des Messrohres [30]*

Es unterscheiden sich zwei grundlegende Prinzipien des Messaufbaues: das Doppelrohrprinzip, welches in den meisten Anwendungsfällen eingesetzt wird, und das Einrohrprinzip. In beiden Fällen kann das meist metallische Messrohr bzw. die Messrohre unterschiedliche Formen aufweisen, beispielsweise einen Bogen, Halbkreis oder eine Deltaform. Davon abhängig sind die notwendige Platzierung der Bewegungssensoren und die genauen internen Berechnungsschritte zur Bestimmung des Massendurchflusses [41].

Eine wichtige Besonderheit der Coriolis-Messung ist die Möglichkeit, den Durchfluss selbst hochviskoser Fluide und homogener Mehrphasengemische mit hoher Genauigkeit zu bestimmen [30]. Neben dieser Besonderheit sind auch folgend beschriebene weitere

Vorteile ausschlaggebend dafür, dass die Coriolis-Massedurchflussmessung speziell bei komplexen Messaufgaben oft als die technisch beste Möglichkeit der Massenstrommessung gilt [41] [43] [38].

- Vorteile:
 - fast alle Medien können gemessen werden
 - sehr hohe Genauigkeit
 - unabhängig von vielen Messstoffeigenschaften wie Leitfähigkeit und Strömungsprofil
 - keine beweglichen Teile
 - auch für besonders geringe Durchflüsse geeignet
- Nachteile:
 - hohe Anschaffungskosten
 - hohe Druckverluste

3.2.4 Füllstandsmessung

Die Messung des Füllstandes bzw. der Füllhöhe einer Flüssigkeit in einem Behälter ist für den SETE-Prozess ebenfalls von Relevanz. Diverse Kältemittelsammler, auf die in Kapitel 5.2.4 näher eingegangen wird, benötigen eine Füllstandsmessung.

Dafür gibt es wie bei allen anderen beschriebenen Messgrößen unzählige Technologien und Methoden. In den meisten Fällen ist das Ergebnis der Messung eine Höhen- bzw. Entfernungsangabe der Flüssigkeit von einem fixen Punkt oder ein Anwesenheitssignal der Flüssigkeit [38] an einem fixen Punkt. Daraus abgeleitet werden können zwei grundlegende Möglichkeiten der Füllstandsmessung: eine kontinuierliche Messung des Flüssigkeitsniveaus in einem offenen oder geschlossenen Behälter und eine Grenzstandmessung, welche lediglich die An- oder Abwesenheit einer Flüssigkeit bestimmt. Beispielhafte Messverfahren für die kontinuierliche Niveaumessung sind das Time-of-Flight Verfahren mittels eines Lasers, die Messung des Füllstandes mittels Ultraschalllaufzeitmessung oder Radars sowie diverse elektrische Messverfahren, bspw. kapazitive und konduktive Verfahren [44]. Zur Bestimmung des Füllstands werden auch diverse Bauformen klassischer Schwimmer, die auf dem Flüssigkeitsniveau aufschwimmen verwendet [38].

Nach Abstimmung und detaillierter Betrachtung gemeinsam mit dem Projektpartner Edtmayer Systemtechnik wurde entschieden, dass für den hier betrachteten Prozess keine kontinuierliche Niveaumessung notwendig, sondern eine reine Grenzstandmessung ausreichend ist. Primäres Ziel der Füllstandsmessung ist die Verhinderung des Trockenlaufens der Pumpe, sowie des Nasslaufens des Kompressors, mehr dazu in Kapitel 5.2.4. Viele der kontinuierlichen Messverfahren sind natürlich auch in der Lage, einzelne Grenzniveaus zu bestimmen, jedoch eignen sich oftmals billigere und vor allem einfachere Verfahren zur reinen Grenzstandmessung besser als komplexe Niveaumessungen. Dabei sind vor allem die umgangssprachlich oft auch als Schwinggabeln bezeichneten Vibrationsgrenzschalter zu erwähnen.

Vibrationsgrenzschalter

Diese Sensoren sind in der Praxis sehr weit verbreitet und beruhen auf dem Prinzip der Dämpfung einer Schwingung durch Kontakt mit Medien. Der Grad der Dämpfung ist auch vom Aggregatzustand des Mediums abhängig. Konkret wird bei der Messung von Flüssigkeiten meist eine zweizinkige Gabelsonde verwendet, welche mittels eines piezoelektrischen Antriebs in eine Schwingung mit definierter Frequenz versetzt wird. Verändert sich in weiterer Folge das die Sonde umgebende Medium, verändert sich auch die Frequenz und die Amplitude der Schwingung, was mittels eines piezoelektrischen Sensors durch kontinuierliche Abfragen erkannt wird [38]. Häufig geben die Hersteller der Sensoren eine minimale Mediendichte an, die für eine ausreichende Genauigkeit notwendig ist. Darauf ist bei der Auswahl des Sensors, abhängig von der Messanforderung, zu achten.

Die größten Vorteile dieses Sensors sind die universelle Einsetzbarkeit und einfache Montage wie Handhabung des Schalters. In Abbildung 16 sind verschiedene Montagepositionen des Sensors in einem geschlossenen Flüssigkeitsbehälter abgebildet. Eine Leerlauf- und gleichzeitige Überfüllsicherung, ist wie ersichtlich mit zwei Vibrationsgrenzschaaltern zu realisieren.

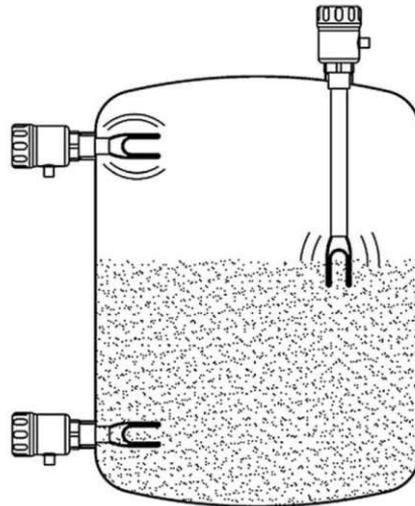


Abbildung 16: *Verschiedene Montagepositionen für Vibrationsgrenzschaalter in Flüssigkeitsbehälter: Leerlauf- und Überfüllsicherung links; vertikaler Grenzstandmelder rechts [38]*

Beim Einbau der Sensoren ist darauf zu achten, dass die Gabel idealerweise senkrecht oder zumindest in einem Winkel von ca. 20° von der Horizontalen eingebaut wird, um das Abtropfen viskoser Medien zu fördern. Dadurch werden Ablagerungen auf dem Sensor vermieden [38].

3.2.5 Prinzip der Wärme- und Kältemengenzählung

Bei der Bestimmung von Energiemengen in Form von Wärme- und Kältemengen spricht man in der Energieversorgung meist von der Verzehlerung. Die Energiemengen können nicht direkt gemessen werden, sondern werden mit einem Rechenwerk aus den Messdaten

anderer physikalischer Größen bestimmt. Die Wärmemenge Q wird über die Integration der Wärmeleistung \dot{Q} über die Zeit t bestimmt, siehe Gleichung (12). Die Wärmeleistung errechnet sich durch Gleichung (13) [45].

$$Q = \int \dot{Q} dt \quad (12)$$

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_w \cdot \Delta T = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_w \cdot (T_{VL} - T_{RL}) \quad (13)$$

Wie aus dieser Formel ersichtlich benötigt man für die Bestimmung der Wärmeleistung \dot{Q} den Wert des Volumenstromes \dot{V} und der Temperaturdifferenz ΔT zwischen Vor- und Rücklauf. Ebenso müssen die Dichte ρ und die spezifische Wärmekapazität c_w des Mediums bekannt sein.

Wärme- und Kältemengenzähler bestehen aufgrund dieses Zusammenhanges aus einem Messgerät für den Volumenstrom bzw. Durchfluss, einem Temperaturfühlerpaar im Vorlauf und Rücklauf, sowie einem elektronischen Rechenwerk zur Verwertung dieser Messinformationen. Weitere Informationen wie die Dichte ρ und die spezifische Wärmekapazität c_w des zu messenden Mediums sind meist im Rechenwerk selbst abgespeichert.

3.3 Regelungstechnik

„Die Regelungstechnik befasst sich mit der Aufgabe, einen sich zeitlich verändernden Prozess von außen so zu beeinflussen, dass dieser Prozess in einer vorgegebenen Weise abläuft.“ So definiert J. Lunze [46] die Aufgaben der Regelungstechnik. Um ähnlichen Aufgabe gerecht zu werden, gibt es grundsätzlich die Möglichkeiten der Steuerung und Regelung eines Prozesses.

Hier beschäftigen wir uns nur mit dem Begriff der Regelung. Die Regelung verarbeitet Größen einer Messung und vergleicht diese mit von außen kommenden Führungsgrößen (Sollwerten). Bei einer Abweichung zwischen der Messgröße und dem Sollwert greift die Regelung in den Prozess ein und verändert gezielt die Parameter des Prozesses. Die Regelung gleicht die Messgröße an die Führungsgröße an, bis keine Abweichung mehr vorliegt. Dadurch entsteht der sogenannte geschlossene Regelkreis [47].

Der Regelkreis besteht grundsätzlich aus drei Komponenten: einer Messeinrichtung, die die für die Regelung notwendigen Informationen aus dem Prozess aufnimmt, einer Regeleinrichtung, die durch den beschriebenen Vergleich aus Führungsgröße und Messgröße versucht deren Abweichung zu verringern und einer Stelleinrichtung, auf die die Regeleinrichtung wirkt und mit der bspw. Massen- oder Energieströme im zu regelnden Prozess verändert werden [48].

Aus diesen drei Geräten folgen die drei wesentlichen Schritte der Wirkungsweise jeder Regelung: das Messen, das Vergleichen und das Stellen [46].

In Abbildung 17 ist die Grundstruktur eines solchen Regelkreises mit den genannten drei Geräten, dem Regler, dem Stellglied und dem Messglied dargestellt. $y(t)$ steht hier für die Regelgröße, $y_m(t)$ für den Messwert, $w(t)$ für die Führungsgröße, $u(t)$ für die Stellgröße und $d(t)$ für die Störgröße [46].

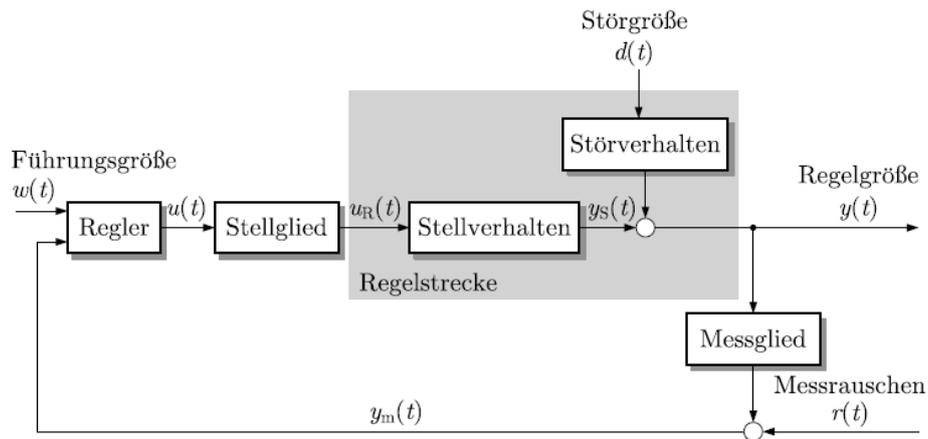


Abbildung 17: Grundstruktur des Regelkreises [46]

Die Regelgröße $y(t)$ hängt von der beeinflussbaren Stellgröße $u(t)$ und der nicht beeinflussbaren Störgröße $d(t)$ ab. Eine ideale Regelung führt die Regelgröße so der Führungsgröße $w(t)$ nach, dass zu jedem Zeitpunkt t gilt $y(t) = w(t)$. Dies kann nur gelingen, wenn der Regler die Stellgröße $u(t)$ so vorgibt, dass dadurch der Einfluss der Störgröße auf die Regelgröße komplett kompensiert wird [46].

3.3.1 Stell- und Regelgröße

In den vorangegangenen Kapiteln ging es um den Messwert $y_m(t)$. Die Regel- und Stellgrößen eines Prozesses werden abhängig von der entsprechenden Regelungsaufgabe ausgewählt. Die Bearbeitung möglicher Regel- und Stellgrößen für den SETE-Prozess wird in Kapitel 5.1 durchgeführt. Prinzipiell lässt sich bei der Auswahl der Regel- und Stellgrößen jedoch auf folgende Dinge hinweisen.

- **Auswahl der Regelgröße:** Welche Größe in einem Prozess als Regelgröße fungiert, geht in vielen Fällen direkt aus der Güteforderung hervor. Die Auswahl wird komplex, sobald einzelne wichtige Signale nicht messbar sind und stattdessen Ersatzgrößen herangezogen werden müssen. Durch eine gute Wahl von Ersatzgrößen kann die Regelaufgabe dennoch meist erfüllt werden.
- **Auswahl der Stellgröße:** Meist gibt es eine Vielzahl an Signalen, welche als Stellgrößen zur Verfügung stehen. Die Wirkungsweise und die zugrundeliegenden Prinzipien müssen gut analysiert werden, damit eine Größe ausgewählt werden kann, die einen ausreichend großen und wenig verzögerten Einfluss auf die Regelgröße besitzt. Geringe Kosten für das Stellglied und die möglicherweise auftretende Erregungen anderer Signale sind ebenfalls Auswahlkriterien [46].

4 Aufbau und Betriebszustände des Prozesses

Wie in Kapitel 1.1 kurz beschrieben, liefert das Forschungsprojekt SETE 2, welches in enger Kooperation mit dieser Arbeit entstand, den finalen Aufbau, die ausgewählten Komponenten und die Betriebszustände des Prozesses. Hier wird nun auf diesen finalen Prozessaufbau, für den das Messkonzept erstellt werden soll, eingegangen und es werden die für die Erstellung des Messkonzeptes notwendigen Betriebszustände erklärt.

4.1 Finaler Aufbau und Funktionsbeschreibung

Abbildung 18 zeigt den finalen Aufbau des Prozesses in vereinfachter schematischer Darstellung. Enthalten sind hier aus Gründen der besseren Übersicht und Verständnis alle Rohrverbindungen und für die Funktion des Prozesses hauptsächlich verantwortlichen Hauptkomponenten. In Abbildung 22 sind zusätzlich alle motorgesteuerten Regelventile enthalten. Zusätzlich notwendige Ventile, Sicherheitseinrichtungen und andere Komponenten sind dem Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema (entstanden im Forschungsprojekt SETE 2) zu entnehmen. Die Sekundärkreise an den Wärmetauschern, in der Abbildung durch rote und blaue Rohrleitungen dargestellt, stehen nur symbolisch für den Anschluss dieser Kreise und entsprechen nicht der tatsächlich notwendigen Anlagenhydraulik bzw. Verschaltung. Der finale Aufbau ist eine Weiterentwicklung der beiden in Kapitel 2.2 beschriebenen Layouts des Patentprozesses in Abbildung 4 und des modifizierten Prozesses in den Abbildungen 5 und 6. Die Veränderungen werden primär in der Wahl des Kältemittels und des daraus folgenden Druckniveaus sowie den auftretenden Aggregatzuständen begründet.

4 Aufbau und Betriebszustände des Prozesses

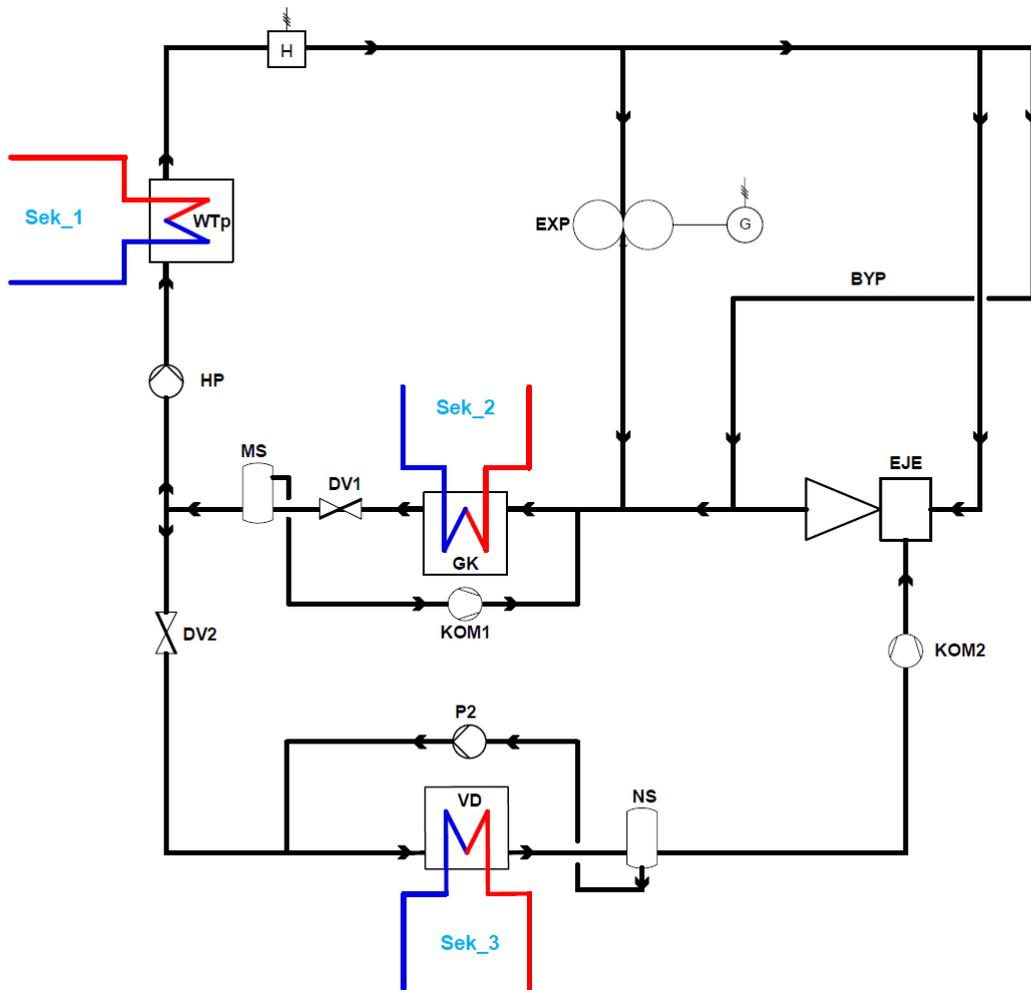


Abbildung 18: Schematische Darstellung des finalen Prozessaufbaus mit den Hauptkomponenten

Tabelle 3: Legende zur Abbildung 18

WTp	Wärmetauscher prim. Wärmeeintrag	H	elektrisches Heizelement
EXP	Expander	EJE	Ejektor
BYP	Bypassstrecke	GK	Gaskühler
HP	Hauptpumpe	VD	Verdampfer
DV1	Drosselventil 1	DV2	Drosselventil 2
KOM1	Kompressor 1	KOM2	Kompressor 2
MS	Mitteldrucksammler	NS	Niederdrucksammler
P2	Pumpe 2	Sek ₁	Sekundärkreis 1
Sek ₂	Sekundärkreis 2	Sek ₃	Sekundärkreis 3

Über den Wärmetauscher (WTp) erfolgt der primäre Wärmeeintrag in das Gesamtsystem. Dieser Wärmetauscher liefert Energie aus einer Wärmequelle im Sekundärkreis 1 (Sek₁) in den Prozess. Die konzipierte Wärmequelle des Prozesses ist das primäre Fernwärme-

Verbundnetz der Wien Energie. Prinzipiell ist diese Quelle jedoch frei wählbar. Das Arbeitsmittel CO_2 wird durch die Druckerhöhung der Hauptpumpe (HP) vom sub- in den überkritischen Zustand versetzt und nimmt im WTP diese Wärme auf. Zusätzlich wird das Arbeitsmittel über ein elektrisches Heizelement (H) geführt, um auch höhere Temperaturen im Prototyp erzeugen zu können und so eine gewisse Flexibilität für die Versuchsphase zu erhalten. Danach gelangt das Arbeitsmittel zu einem der drei folgenden Bauteile. Die Optionen sind der Expander (EXP) mit Generator, ein Strahlapparat/Ejektor (EJE), sowie eine Bypassstrecke (BYP). Der Bereich zwischen der HP und diesen drei Optionen ist der Bereich mit dem höchsten Druck in der Anlage. Deswegen wird er auch Hochdruckbereich genannt. Vom EJE, EXP bzw. des BYP gelangt das Kältemittel in einen transkritischen Kältekreis. Die Funktion und die physikalischen Grundlagen dazu sind in Kapitel 2.1.1 und 2.1.3 beschrieben. Der EJE dient hier als Ersatz für den Verdichter in einem klassischen Kälteprozess. Das CO_2 aus dem Hochdruckbereich fungiert als Treibdampf für den Verdichtungsprozess und erhöht das Druckniveau des Kältemittelstromes aus dem Kompressor 2 (KOM2). Als nächste Komponente, analog zum klassischen transkritischen Kreisprozess, folgt der Gaskühler (GK), in dem die Wärme im Idealfall über einen Heiz-/Warmwasserkreislauf - Sekundärkreis 2 (Sek₂) - ausgekoppelt und genutzt werden kann. Alternativ muss hier eine Rückkühlung der Wärme erfolgen, um die Funktion des Prozesses gewährleisten zu können. Da das CO_2 nach dem GK immer noch in einem leicht überkritischen Zustand vorliegt, wird das Kältemittel in einem Drosselventil 1 (DV1) weiter entspannt und in einen Mitteldrucksammler (MS) geführt. Dort separiert sich die flüssige und gasförmige Phase voneinander. Das übrige CO_2 -Gas wird über eine Rückführung mithilfe des Kompressors 1 (KOM1) vor dem GK wieder beigemischt. Das flüssige CO_2 aus dem MS wird nun entweder über die HP wieder zum WTP geführt oder es wird im Drosselventil 2 (DV2) weiter entspannt und folgt dem Kältekreislauf. Nach der weiteren Entspannung verdampft das CO_2 im Verdampfer (VD), wo die gewonnene Kälte im Sekundärkreis 3 (Sek₃) weiterverwendet werden kann. Durch einen Niederdrucksammler (NS) nach dem VD wird sichergestellt, dass der KOM2 keine Flüssigkeitströpfchen ansaugt. Über die Pumpe 2 (P2) wird die sich sammelnde Flüssigkeit vor dem VD dem Prozess wieder zugeführt. Der KOM2 dient als Vorverdichtung vor dem EJE und ist notwendig, um den von vielen EJE-Typen gewünschten Druckhub zu erreichen.

Die größten Unterschiede in diesem finalen Aufbau zu den im Kapitel 2.2 beschriebenen Anlagenlayout sind die beiden notwendigen Sammler, die Bypassstrecke sowie die Gasrückführung nach dem GK, die Flüssigkeitsrückführung nach dem VD und der KOM2.

4.2 Betriebsmodi

Die vollständige Abnahme der produzierten Wärme und Kälte sowie des produzierten Stroms zu jeder Zeit ist für den Betrieb des Prozesses essenziell. Der Prozess braucht bestimmte Enthalpieänderungen, da die Funktion der Anlage sonst nicht gewährleistet ist. Die notwendige Abnahme von Wärme, Kälte und Strom ist natürlich von vielen Faktoren, wie bspw. der Jahreszeit oder dem genauen Abnehmer*innenverhalten abhängig. Um dieser sich ständig verändernden Anforderung nach Wärme-, Kälte- und Stromproduktion gerecht zu werden, gibt es mehrere Schaltungsvarianten oder Betriebsmodi der Anlage.

Die Komponenten der Anlage sind auf genau diese Betriebsmodi ausgelegt und stellen wichtige Randbedingungen für die Auswahl der Messtechnik dar.

Die Philosophie hinter dem Betrieb des Prozesses ist es, die Temperatur- und Druckniveaus innerhalb der Anlage in jedem Betriebszustand konstant zu halten. Davon ausgenommen sind Anfahr- und Abschaltzustände. Um produzierte Leistungen verändern zu können, bleibt also nur mehr der Kältemittelmassenstrom als freier Parameter übrig. Die Betriebsmodi unterscheiden sich untereinander also lediglich in den Massenströmen in den einzelnen Abschnitten. Konkret werden teilweise einzelne Bereiche des Prozesses überhaupt nicht befahren. Die entscheidenden Komponenten und Strecken, in denen der Massenstrom für die verschiedenen Betriebsmodi variiert werden, sind der Ejektor (EJE), der Expander (EXP) und der Bypass (BYP) sowie deren Leitungsstränge. Der Betrieb des EXP ist direkt für die Gewinnung und Auskopplung von Elektrizität verantwortlich. Der Betrieb des EJE beeinflusst dagegen die Kälteproduktion des Prozesses direkt. Die Wärmeauskopplung über den Gaskühler (GK) ist in jedem Modus als zwingend notwendiges Beiprodukt zu verstehen. Die Leitungen des BYP sind nur für den Anfahrbetrieb des Prozesses vorgesehen. Wichtig zu erwähnen ist, dass die Betriebsmodi jeweils Auslegungszustände für den Ejektorstrang und den Expanderstrang darstellen. Die Leistung und der Massenstrom über diese Komponenten sind also jeweils maximal. Diese Zustände bestimmen also die Obergrenzen der erforderlichen Messbereiche der verwendeten Sensorik in diesen Strängen. Inwieweit etwaige Teillastzustände auftreten können, ist von den jeweiligen Komponenten abhängig und wird im Forschungsbetrieb der zukünftigen Prototypenanlage eine wesentliche Forschungsfrage darstellen.

4.2.1 Betriebsmodus 1: EXP aktiv & EJE inaktiv & BYP inaktiv

Abbildung 19 zeigt den Prozess im Betriebsmodus 1. Läuft die Anlage in diesem Modus, ist die Stromproduktion der essenzielle Output der Anlage und die Wärme dient als Zusatz. Hier gibt es keine Kälteauskopplung, weshalb der Prozess zum Beispiel für etwaige Winterfälle verwendet werden kann. Realisiert wird dieser Betriebsmodus dadurch, dass die gesamte von der Hauptpumpe (HP) geförderte Kältemittelmenge über den Expander (EXP) geführt wird, dieser also aktiv ist. Gleichzeitig wird der Ejektor (EJE) deaktiviert und nicht von Kältemittel durchflossen. Gleiches gilt für die Bypassstrecke (BYP). Dies hat zur Folge, dass der Kältekreis über den Verdampfer aufgrund der fehlenden Verdichterfunktion des Ejektors auch nicht durchströmt wird. Das CO₂ wird nach der Komprimierung durch die HP und der Erwärmung im WTp also lediglich über den Expander und den Gaskühler (GK) geleitet, bevor es mit Ausnahme der im Sammler abgetrennten und rückgeführten Menge wieder zur HP gelangt. Die Leitungen und Komponenten, die in diesem Betriebsmodus 1 nicht durchströmt werden, sind in Abbildung 19 ausgegraut.

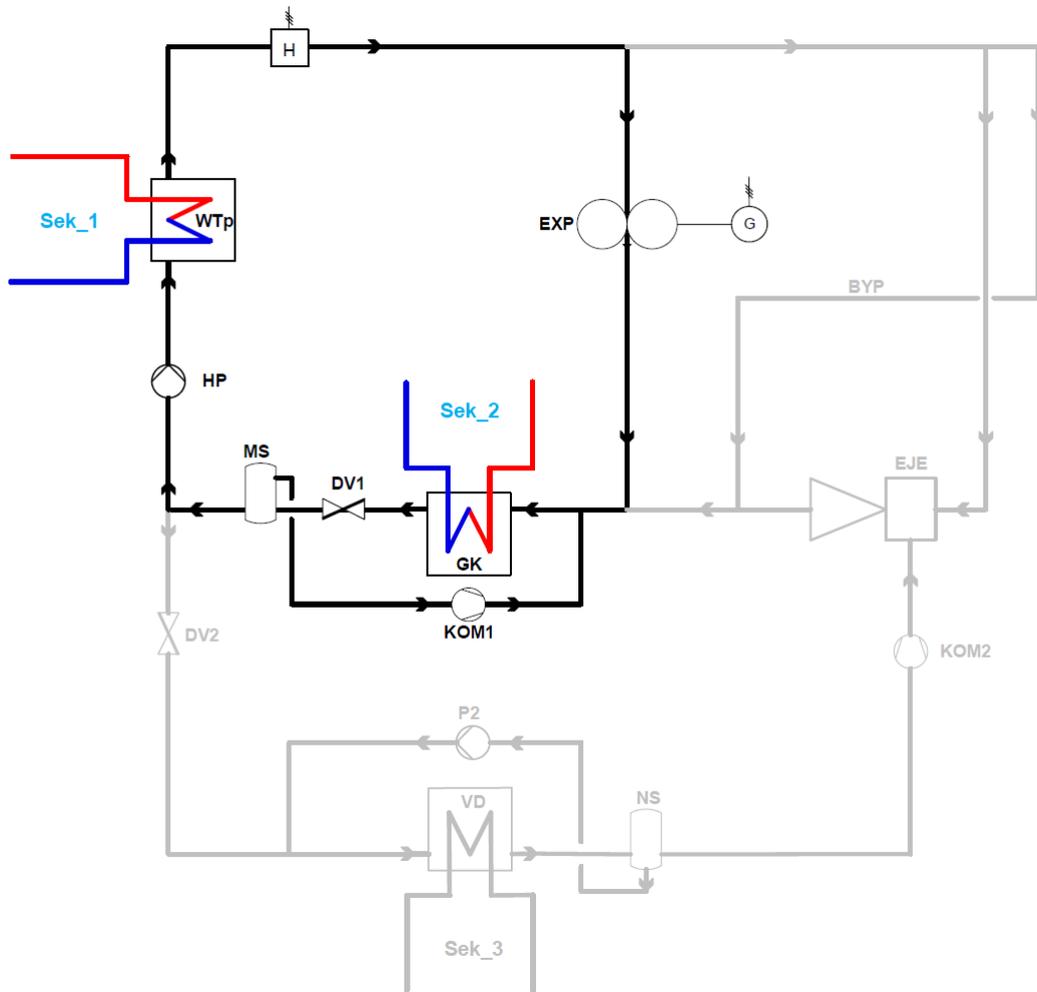


Abbildung 19: Betriebsmodus 1: EXP aktiv & EJE inaktiv & BYP inaktiv

4.2.2 Betriebsmodus 2: EXP inaktiv & EJE aktiv & BYP inaktiv

Abbildung 20 zeigt den Betriebsmodus 2 des Prozesses. Dieser verhält sich grundsätzlich genau umgekehrt zum Betriebsmodus 1. Der Ejektor (EJE) ist nun aktiv, während der Expander (EXP) und die Bypassstrecke (BYP) inaktiv sind. Da der Expanderstrang in diesem Betriebsmodus nicht befahren wird, gibt es keinen Stromoutput. Allerdings wird nun durch das Befahren des Ejektors der Kältekreis mit der Kälteauskopplung am Verdampfer (VD) aktiviert. Die Wärmeauskopplung am Gaskühler (GK) ist abermals der notwendige Zusatz zur Kälteauskopplung. Das CO₂ gelangt also nach der Komprimierung durch die Hauptpumpe (HP) und der Erwärmung im WT_p zum EJE, der den Saugmassestrom aus dem Kompressor 2 (KOM2) verdichtet und so den Kältekreislauf aktiviert. Die Leitungen und Komponenten, die in diesem Betriebsmodus 2 nicht durchströmt werden, sind in Abbildung 20 ausgegraut.

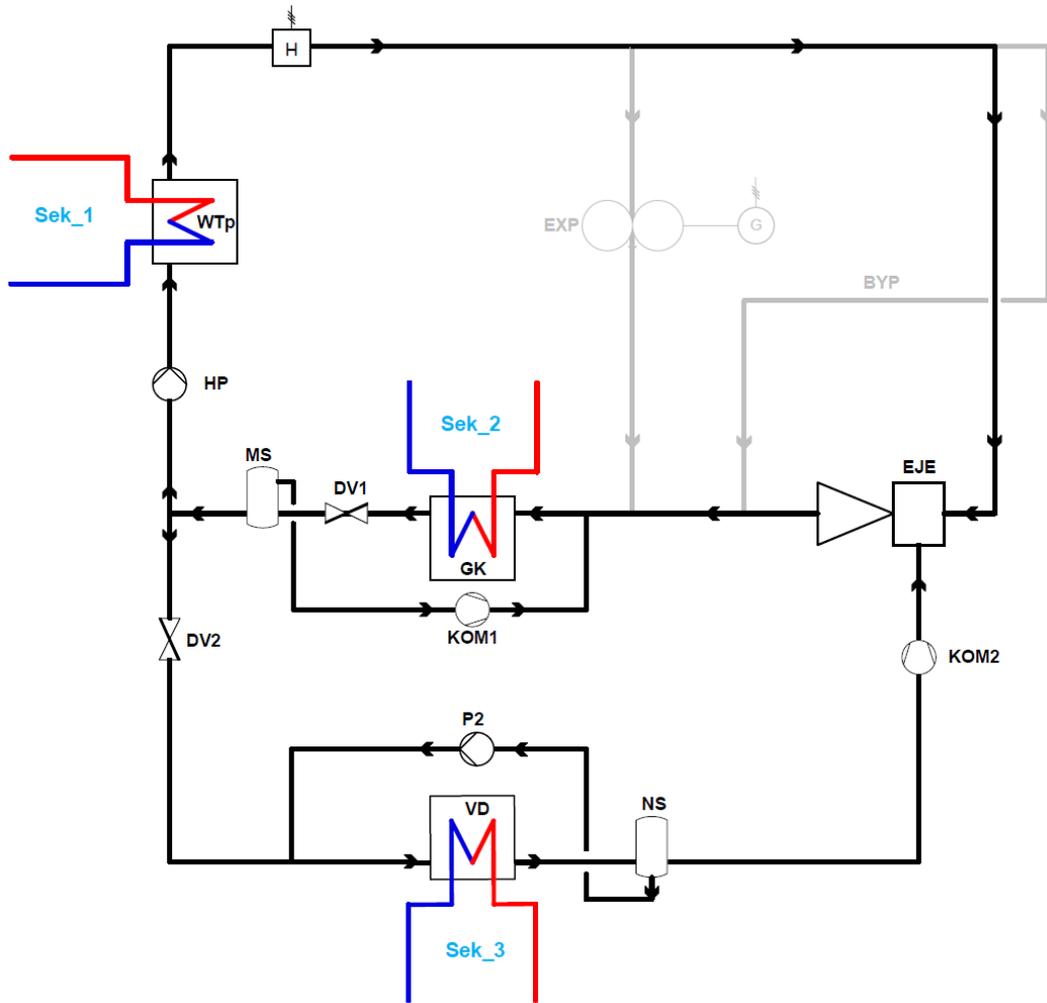


Abbildung 20: Betriebsmodus 2: EXP inaktiv & EJE aktiv & BYP inaktiv

4.2.3 Betriebsmodus 3: EXP aktiv & EJE aktiv & BYP inaktiv

Soll nun sowohl Strom als auch Kälte produziert werden, abermals mit Wärme als notwendigem Zusatz, ist ein Mischbetrieb der beiden zuvor beschriebenen Betriebsmodi notwendig. Dieser Betriebsmodus 3 befährt nun sowohl den Strang des Ejektors (EJE) als auch des Expanders (EXP). Einzig die Bypassstrecke wird inaktiv geschaltet. Der restliche Betriebsmodus entspricht der ursprünglichen Abbildung 18. Die Massenströme über den Expander- und den Ejektorstrang waren bereits in den Betriebsmodi 1 und 2 maximiert, und sind nun in Betriebsmodus 3 gleich groß. Der Leitungsabschnitt zwischen dem Mischpunkt nach dem EJE und EXP bis zum Teilungspunkt der Massenströme vor dem EJE und EXP hat nun einen höheren Massenstrom zu fördern. Dies ist der Fall da sowohl der EJE als auch der EXP mit der maximalen Kältemittelmenge versorgt werden. Der Betriebsmodus 3 ist also auch jener mit dem höchsten Wärmeeintrag über den WTP in das Gesamtsystem.

4.2.4 Betriebsmodus 4: EXP inaktiv & EJE inaktiv & BYP aktiv

Bei Erstinbetriebnahme nach Füllung bzw. als Anfahrbetrieb nach längerem Stillstand und damit verbundener Auskühlung/Erwärmung des Kältemittels kommt der Betriebsmodus 4 zum Einsatz. Die Druck- und Temperaturniveaus, die für den Normalbetrieb notwendig sind, werden hier (noch) nicht erreicht. Vereinfacht ausgedrückt herrscht nach der Befüllung der Anlage in jedem Prozesspunkt der gleiche Druck und die gleiche Kältemitteltemperatur. Um langsam durch den Betrieb der Hauptpumpe (HP) und durch den Wärmeeintrag durch den WTP auf die gewünschten Betriebszustände zu kommen, zirkuliert das Kältemittel über eine Bypassstrecke (BYP) und den Gaskühler (GK). Es ist nicht gewährleistet, dass der Expander (EXP) sowie der Ejektor (EJE) mit den nach Stillstand bzw. Füllung vorherrschenden Betriebsparametern betrieben werden können. Um dennoch eine Zirkulation des Kältemittels gewährleisten zu können, gibt es diese extra BYP. Eventuell ist jedoch eine zusätzliche Enthalpiesenke in dieser Bypassstrecke notwendig. Sobald die minimal notwendigen Parameter für einen der beiden anderen Stränge erreicht werden, kann aus diesem Anfahrbetriebsmodus auf einen der drei bereits beschriebenen Betriebsmodi umgeschaltet werden.

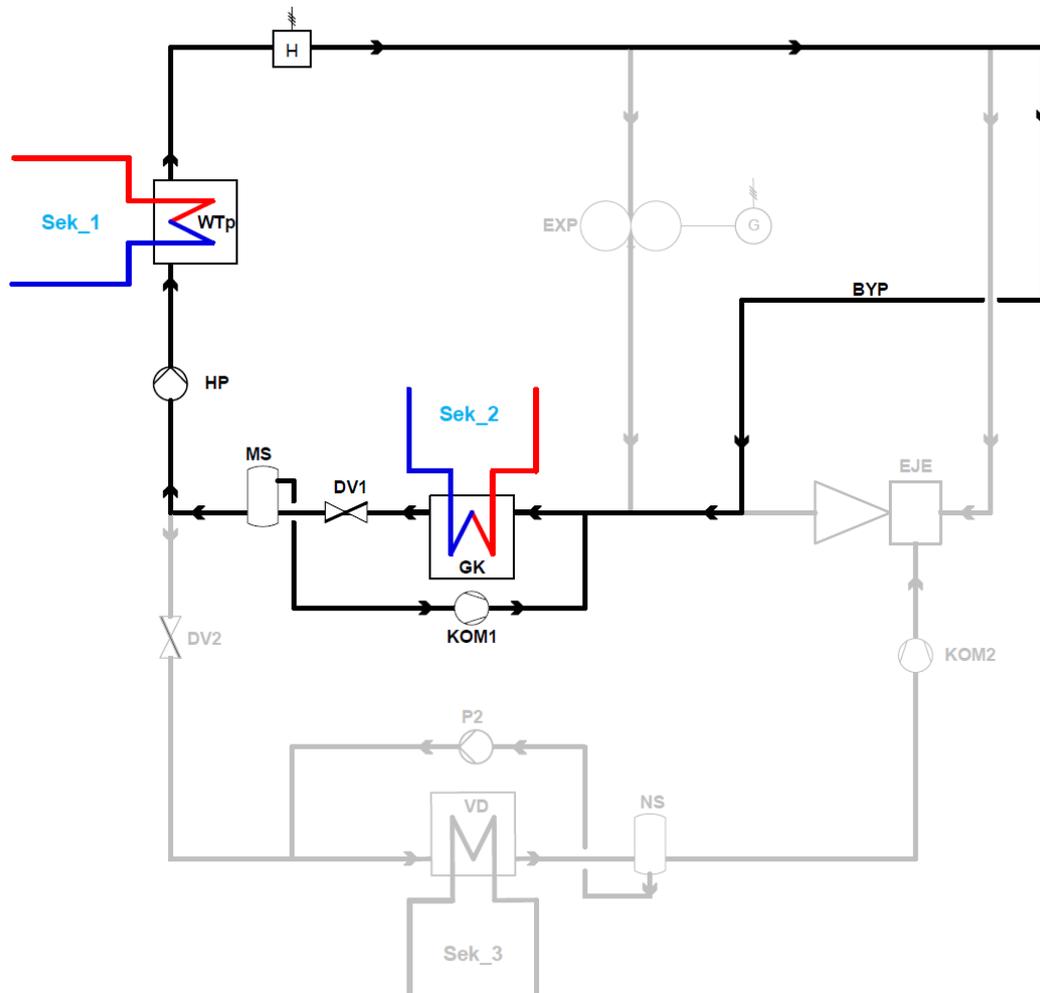


Abbildung 21: Betriebsmodus 4: Anfahrbetrieb - EXP & EJE inaktiv & BYP aktiv

5 Erstellung des Messkonzepts

5.1 Regel- und Stellgrößen verwandter Prozesse

Um das Messkonzept für den späteren Betrieb des Prototyps vorzubereiten, sind Überlegungen zur späteren Regelungstechnik fundamental. Die vollständige Entwicklung eines Regelungskonzeptes ist vor allem für einen neuartigen Prozess eine sehr komplexe Aufgabe. Dafür ist eine genaue regelungstechnische Analyse der späteren Anlage notwendig. Dies erfolgt in Form der mathematischen dynamischen Modellbildung der einzelnen Komponenten und in weiterer Folge des Gesamtsystems. Neben der grundlegenden Aufstellung des Regelungsentwurfes gibt es unzählige Möglichkeiten, diese Regelung zu optimieren. Arbeiten wie von A. Varchim [49], M. Graeber [50] oder M. Nöding [51] beschäftigen sich genauer mit diesem Thema.

Da die Entwicklung des Regelungskonzeptes den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde - und daher nicht enthalten ist - die Messtechnik jedoch auf die späteren Regelungsmöglichkeiten des Prototyps vorbereitet werden soll, ist die Betrachtung bestehender vergleichbarer Anlagen und Regelungen sinnvoll. Wie im Grundlagenkapitel 3.3 angeführt, beinhaltet eine Regelaufgabe jeweils Stell- und Regelgrößen, die von der Anforderung der Regelung, der Güteforderung und dem Prozess abhängen. Eine der ersten wichtigen Punkte der Regelungsentwicklung ist also die Frage: Welche Größen sollen geregelt werden, und welche Stellglieder stehen dafür zur Verfügung? Die Eigenschaften der Messtechnik des Prozesses, richten sich nach dieser Wahl der Stell-, aber vor allem der Regelgrößen, da der Messwert $y_m(t)$ ein wichtiger Baustein des Regelkreises ist. Messungen, die zukünftig Teil eines Regelkreises sein könnten, unterliegen anderen Anforderungen wie Messungen, die rein dem Informationsgewinn dienen. Deswegen werden hier erste mögliche Stell- und Regelgrößen für den Prototyp identifiziert.

Ein Ausblick über diese Arbeit hinaus zeigt, dass der nächste Schritt der Regelungsentwicklung, nach der endgültigen Auswahl sinnvoller Stell- und Regelgrößen, die Untersuchung der Kopplungen zwischen einzelnen Größen ist. Dabei stehen die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Größen im Fokus. Eine Beschreibung dieser Wirkung ist wichtig, um eine sinnvolle Regelungsstruktur auswählen zu können. Dabei lässt sich grundlegend zwischen der Ein- und Mehrgrößenregelung unterscheiden [49].

Die Identifizierung möglicher Stell- und Regelgrößen erfolgt unter anderem durch die Analyse bestehender Regelungen vergleichbarer Prozesse. Meist sind dies Regelungskonzepte einfacher Wärmepumpen- und Kältekreise, sowohl mit CO_2 als auch mit anderen Kältemitteln. Teilweise unterscheiden sich die Prozesslayouts deutlich vom hier betrachteten SETE-Prozess, dennoch können dadurch einige wichtige Größen identifiziert werden. Diese betreffen jedoch ausschließlich den Kältekreis zwischen Gaskühler (GK) und Verdampfer (VD). Es werden hier sowohl tatsächlich umgesetzte experimentelle Anlagen als auch theoretische Regelungskonzeptentwürfe herangezogen. Die in der Tabelle 4 zusammenfas-

5 Erstellung des Messkonzepts

send aufgelisteten Regelgrößen verwandter Prozesse haben Einfluss auf den endgültigen Vorschlag des Messkonzeptes, da die Größen möglicherweise auch in der Regelung des SETE-Prototyps verwendet werden können. Die Auflistung hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit und die Verwendung dieser Größen als Regelgrößen sind letztendlich immer vom finalen Prozesslayout abhängig. Dennoch werden diese Regelgrößen als potentiell relevante Größen für die Regelung des SETE-Prozesses erachtet und stellen für die Entwicklung des Prozesses einen Mehrwert dar.

Tabelle 4: *Primäre Regelgrößen verwandter Prozesse*

Regelgröße	erwähnt in
Unterkühlung ΔT_k nach dem Gaskühler (GK)	[50] [49] [51]
Überhitzung ΔT_h nach dem Verdampfer (VD)	[52] [19] [7] [49] [51]
Ausgangstemperatur $T_{GK,aus}$ des GK	[52] [51]
Ausgangstemperatur $T_{VD,aus}$ des VD	[52]
Füllstand im Mitteldrucksammler (MS)	[52]
Druckverlust Ventil vor Hochdrucksammler (DV1)	[52]
Druck p_{GK} im GK	[52] [5] [19] [7] [49] [53] [51]
Druck p_{VD} im VD	[52] [49] [53] [51]
Ausgangstemperatur Sekundärfluid GK	[54] [19] [49]
Ausgangstemperatur Sekundärfluid VD	[49] [50] [51]
Kälteleistung	[1] [13] [7] [53]

Zur Vollständigkeit werden in Tabelle 5 auch die primären Stellgrößen, welche in der in Tabelle 4 erwähnten Literatur vorkommen, aufgelistet.

Tabelle 5: *Primäre Stellgrößen verwandter Prozesse*

Stellgröße	erwähnt in
Volumenstrom durch Verdichterdrehzahl ²	[13] [19] [7] [49] [50] [53] [51]
Volumenstrom durch regelbaren Ejektor	[13]
Öffnungsgrad Expansionsventil (DV2)	[13] [19] [7] [49] [50] [53] [51]
Volumenstrom durch Verdichterdrehzahl in Sekundärkreisen	[49] [50] [53] [51]

Die in Tabelle 4 vorkommenden Begriffe der Unterkühlung ΔT_k und Überhitzung ΔT_h sind wichtige Konzepte der Thermodynamik und Kältetechnik. Sie beschreiben die Differenz zwischen einem gemessenen Temperaturwert und der dazugehörigen Sättigungstemperatur [55]. So errechnet sich beispielsweise die Unterkühlung des Kältemittels ΔT_k nach dem GK als Differenz zwischen Sättigungstemperatur T_s und der gemessenen Austrittstemperatur nach dem GK $T_{GK,aus}$, siehe Gleichung (14) [50].

$$\Delta T_k = T_s - T_{GK,aus} \quad (14)$$

²Der hier angeführte Verdichter wird im SETE-Prozess durch den Ejektor (EJE) ersetzt.

Die Sättigungstemperatur T_s ist vom vorherrschenden Druck abhängig. Um diese Temperatur bestimmen zu können, muss also der Druck am Gaskühlerausgang $p_{GK,aus}$ ebenfalls bestimmt werden [55]. Prinzipiell gibt es auch andere Möglichkeiten, die Unterkühlung am GK oder die Überhitzung am VD zu bestimmen, beispielsweise durch die Messungen der Temperatur vor und nach der Komponente [7].

Das in weiterer Folge beschriebene Messkonzept greift alle in Tabelle 4 beschriebenen Regelgrößen auf und bereitet die elektronische Messtechnik auf mögliche Regelungsaufgaben vor. Ausgenommen davon ist der Füllstand im Mitteldrucksammler (MS). In Absprache mit dem Kooperationspartner Edtmayer Systemtechnik wurde beschlossen, keine kontinuierliche elektronische Füllstandsmessungen in den diversen Sammlern vorzusehen, da die notwendige Investition die abgeschätzte Notwendigkeit übersteigt. Näheres dazu in Kapitel 5.2.4. Es werden analoge Schaugläser zur Befüllung der Anlage verbaut.

5.2 Betrachtung Messstellen und messtechnische Anforderungen

Aus dem in Kapitel 4 beschriebenen finalen Prozesslayout und den dort definierten möglichen Betriebszuständen ergeben sich nun physikalisch genau definierte Zustände an den verschiedenen Punkten, Komponenten und Rohrabschnitten im System. Theoretisch gibt es unendlich viele solcher Zustände im Prozess. Um diese beschreiben zu können, werden die kleinen ständig auftretenden Fluktuationen in Durchfluss, Temperatur und Druck aufgrund von beispielsweise Abkühlung oder Druckverlusten im Rohr vernachlässigt. Dadurch lassen sich Prozesspunkte im System definieren, die festgehaltene Betriebsgrößen in bestimmten beschriebenen Prozesszuständen besitzen. Im ersten folgenden Unterkapitel 5.2.1 geht es sowohl um die Definition der örtlichen Situierung dieser Punkte als auch um die vorherrschenden physikalischen Größen an diesen Punkten. In den weiteren Kapiteln geht es darum, festzulegen, welche physikalischen Größen an welchen Prozesspunkten tatsächlich gemessen werden müssen und wieso dies der Fall ist. Weiters werden spezifische Anforderungen an die Messungen definiert, die für die endgültige Auswahl der Sensorik maßgebend sind. Es sind im primären Prozesskreis sowohl Messungen des Durchflusses, der Temperatur, des Druckes sowie des Füllstandes notwendig. Messungen von Größen, die für die vollständige Energiebilanzierung in den Sekundärkreisen notwendig sind, sowie Messungen elektrischer Leistungen und Energien werden in Kapitel 5.4 gesondert beschrieben.

5.2.1 Prozesspunkte

Der genaue Messort hat, wie in Kapitel 3.1 beschrieben einen großen Einfluss auf die Messung physikalischer Größen. Um die festgelegten Messorte beschreiben zu können, werden in Abbildung 22 sämtliche Prozesspunkte im Prozessschema identifiziert und mit Nummern versehen. Wichtig ist, dass diese Prozesspunkte wegen der tatsächlich entstehenden Druck-, Temperatur- und Durchflussänderungen idealisiert sind. Dennoch bilden diese Punkte die wichtigsten zu betrachtenden Punkte im System ab. Durch die Betrachtung ihrer Gesamtheit wird der gesamte Prozess ausreichend definiert. Im Vergleich zu Abbildung 18, die den finalen Aufbau des Layouts beschreibt, sind hier in Abbildung 22 zusätzlich die für den Betrieb notwendigen motorgesteuerten Regelventile RV1-8 enthalten.

5 Erstellung des Messkonzepts

In den folgenden Unterkapiteln werden die vorherrschenden Zustände im Bezug auf Temperatur, Druck und Massenstrom für die einzelnen Prozesspunkte, welche mit Messtechnik versehen werden sollen, angeführt. Aus den in Kapitel 4 definierten Betriebszuständen ergeben sich jeweils minimale, maximale und für den Betrieb normale Werte für die beschriebenen Größen. Der Phasenzustand des Kältemittels im Betrieb ist bei den für die Durchflussmessung relevanten Punkten ebenfalls angeführt und für die Auswahl der Messtechnik essenziell. Wichtig ist, dass die angeführten Phasen im normalen Betriebszustand auftreten, was durch das Layout und den Betrieb des Prozesses gewährleistet ist. Sollte sich bei den angeführten maximalen oder minimalen Temperaturen und Drücken ein anderer Phasenzustand ergeben, ist durch den Betrieb der Anlage sichergestellt, dass diese maximalen und minimalen Werte nicht gleichzeitig auftreten können, oder der entsprechende Prozesspunkt nicht befahren wird. Der Phasenzustand ist ein primärer Faktor für die Funktion des Prozesses und wird daher mit höchster Priorität im Zustand fixiert. Die physikalischen Größen und Zustände wurden durch die Kooperation mit den beiden Projektpartnern erarbeitet: durch Simulationen der FH Burgenland und weiteren Berechnungen der Firma Edtmayer Systemtechnik.

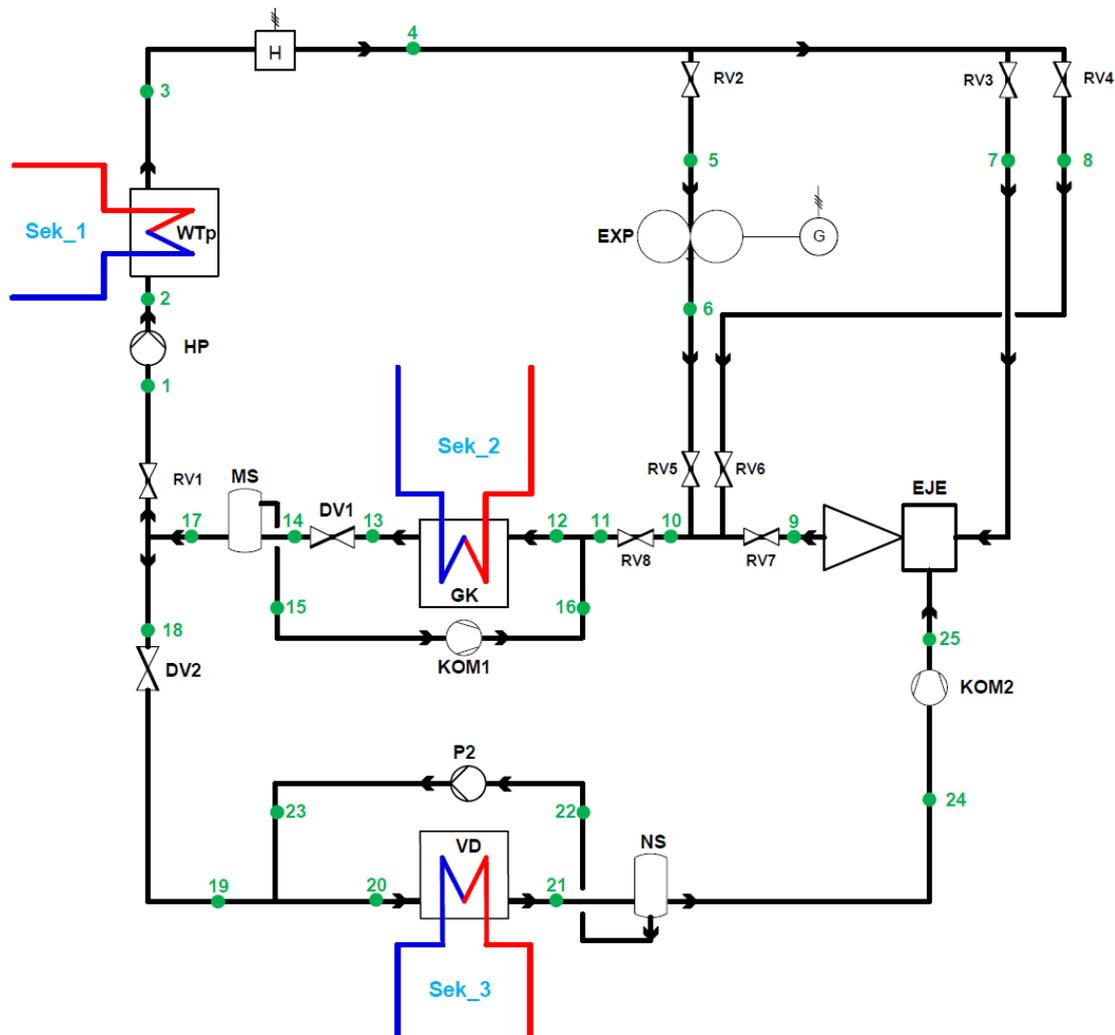


Abbildung 22: Prozesspunkte des finalen Layouts des SETE 2 - Prozesses

Tabelle 6: *Legende zur Abbildung 22*

WTP	Wärmetauscher prim. Wärmeeintrag	H	elektrisches Heizelement
EXP	Expander	EJE	Ejektor
BYP	Bypassstrecke	GK	Gaskühler
HP	Hauptpumpe	VD	Verdampfer
DV1	Drosselventil 1	DV2	Drosselventil 2
KOM1	Kompressor 1	KOM2	Kompressor 2
MS	Mitteldrucksammler	NS	Niederdrucksammler
P2	Pumpe 2	Sek ₁	Sekundärkreis 1
Sek ₂	Sekundärkreis 2	Sek ₃	Sekundärkreis 3
RV1-8	motorgesteuertes Regelventil 1-8		

5.2.2 Messstellen und Anforderungen der Durchflussmessung

Die Durchflussmessung ist in diesem Prozess eine besondere Aufgabe. Die teilweise transkritische Phase, die sehr hohen Druckniveaus und das Kältemittel CO₂ sind dabei die größten Herausforderungen. An welchen Messpunkten Durchflussmessungen notwendig sind, ist allerdings primär vom Layout und den Betriebszuständen abhängig. Wo solche Messgeräte notwendig und sinnvoll sind, ergibt sich durch die intensive Auseinandersetzung mit dem Prozess und intensiven Diskussionen mit den Projektpartnern. Die ausgewählten Messstellen sowie die dort vorherrschenden Anforderungen an die Messung werden nachfolgend beschrieben.

Prozesspunkte 1 und 18 - Kältemittelverteilung WTP/VD

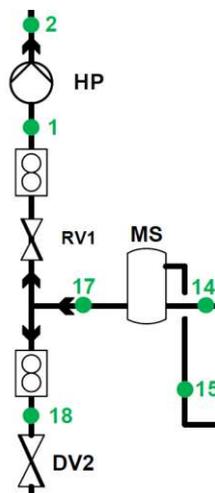


Abbildung 23: *Detailansicht Prozesspunkte 1 und 18*

Eine Durchflussmessung im **Prozesspunkt 1**, siehe Abbildung 23, ist unverzichtbar. Diese Messung erfasst den Hauptstrang der Anlage und gibt daher grundlegende Informationen über die zirkulierende Kältemittelmenge. Die Hauptpumpe (HP) verdichtet zu jedem Zeitpunkt 100 % des Kältemittels welches über den EJE, EXP oder BYP geführt wird. Durch die Durchflussmessung an diesem Punkt ist also die Gesamtheit des für den

5 Erstellung des Messkonzepts

Betriebszustand eingesetzten Durchflusses erfasst. Die Messung ist aus verschiedenen Gründen essenziell, etwa um die vollständige Funktion des Prozesses sicherstellen zu können oder um Erkenntnisse aus dem Betrieb eines Prototyps dieser Anlage zu generieren. Falls notwendig, kann die Messung an diesem Punkt auch für die Regelung der HP verwendet werden. Diese Aufgabe wird jedoch primär von anderen Messgeräten übernommen und dient voraussichtlich nur als Alternative.

Die gleichen Argumente würden für eine Messung im Prozesspunkt 2 sprechen. Ein zusätzliches Argument für Punkt 2 ist der Erfahrungswert des Projektpartners Firma Edtmayer Systemtechnik, dass zusätzliche Druckverluste in einer Leitung bspw. durch eine Durchflussmessung, nicht in die Saugseite einer Pumpe verbaut werden sollten. Der Grund für die Platzierung der Durchflussmessung in Punkt 1 statt 2 liegt in den verschiedenen Zuständen der beiden Punkte. Während, wie in Tabelle 7 und 8 ersichtlich, in Punkt 1 das Kältemittel in flüssiger Form und bei einem moderaten Druck von rund 50 bar vorliegt, sind die Parameter in Prozesspunkt 2 deutlich schlechter für eine Durchflussmessung geeignet. In Punkt 2 befinden sich das Medium im überkritischen Phasenzustand mit einem Druck von 127 bar. Dieser Zustand lässt sich nur durch wenige hochmoderne Messgeräte unter großem Aufwand vermessen. Nur 2 von 14 angefragten Herstellern trauen sich eine verlässliche Messung in diesem Prozesspunkt 2 zu.

Die Durchflussmessung in **Prozesspunkt 18**, ersichtlich in Abbildung 23, ist ebenfalls zwingend notwendig. Dadurch ist die Flüssigkeitsmenge, welchen den Mitteldrucksammler (MS) verlässt, zu jedem Zeitpunkt in jedem Betriebszustand definiert. Auch die Menge an Kältemittel, welche über den Kältekreis und in weiterer Folge den Verdampfer (VD) geführt wird, wird dadurch erfasst. Die Messung erfüllt voraussichtlich reine Monitoringzwecke und wird für keine Regelung verwendet werden. Bis auf die Durchflussmengen und die im Betrieb minimal unterschiedlichen Druckniveaus unterscheiden sich die Prozesspunkte 18 und 1 nicht voneinander.

Die Durchflussmesssysteme beider Punkte müssen den Temperaturen und Drücken aus Tabelle 7 und 8 standhalten und den Messbereich des Durchflusses entsprechend erfüllen. Die Messgenauigkeit sollte hier maximal 1 % des Messwertes betragen. Wichtiger als die Messgenauigkeit scheint hier die Zuverlässigkeit und Reproduzierbarkeit der Messung zu sein. Zusätzlich zur Durchflussmessung wäre eine automatische Dichtemessung, aufgrund der Phasenlage nahe der Siedelinie des Kältemittels, wünschenswert, um den endgültigen Phasenzustand auf jeden Fall bestimmen zu können.

Tabelle 7: *Temperaturen und Drücke der Prozesspunkte 1 und 18*

Punkt	T_{\min} / °C	T_{norm} / °C	T_{\max} / °C	p_{\min} / bar	p_{norm} / bar	p_{\max} / bar
1	14,0	14,1	25,0	48,9	49,7	55,0
18	14,0	14,1	25,0	49,0	49,7	55,0

Tabelle 8: Durchflüsse und Phasenzustände der Prozesspunkte 1 und 18

Punkt	\dot{m}_{\min} / $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	\dot{m}_{norm} / $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	\dot{m}_{\max} / $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	Phasenzustand
1	0,83	2,00	2,2	Flüssigkeit
18	0	0,37	0,40	Flüssigkeit

Prozesspunkte 15 und 22 - Rückführungen GK/VD

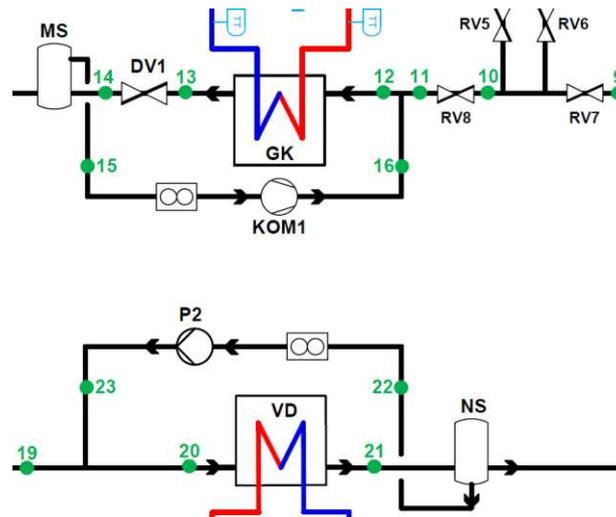


Abbildung 24: Detailansicht Prozesspunkte 15 und 22

Sowohl nach dem GK als auch nach dem VD sind Sammler (MS und NS) vorgesehen, um die möglicherweise vorliegenden zweiphasigen Nassdampfgemische klar in eine flüssige und eine gasförmige Phase aufzutrennen. Nach dem MS wird die flüssige Phase, und nach dem NS die gasförmige Phase weiterverwendet. Das Kältemittel in der verbliebenen anderen Phase wird über eine Rückführung mittels KOM1 bzw. P2 vor den jeweiligen Wärmetauscher rückgeführt. Dies ist laut den Projektpartnern eine notwendige Maßnahme, um die gewünschten Phasen zu jedem Zeitpunkt stabil zu halten. Wie viel Kältemittel im tatsächlichen Betrieb rückgeführt werden muss, ist Untersuchungsgegenstand der Versuchsphase des Prototyps. Um die Kältemittelmengen direkt zu bestimmen ist in **Prozesspunkt 15** und **22** eine Durchflussmessung vorgesehen. Diese Messung ist für den Betrieb selbst sowie seine Regelung nicht zwingend notwendig, jedoch für das Messkonzept des Prototyps aus beschriebenen Grund sinnvoll. Um die Durchflussmenge über die Rückführungen sowie die Wärmetauscher klar zu bestimmen, würde theoretisch auch die Platzierung der Durchflussmessgeräte direkt im Strang des Wärmetauschers, bspw. Prozesspunkt 12 und 20, funktionieren. Aufgrund des dort nicht auszuschließenden Zweiphasengebietes wird davon jedoch abgesehen.

Die Messgeräte sind jeweils auf der Saugseite des Kompressors sowie der Pumpe platziert und müssen die Temperatur- und Druckerfordernungen aus Tabelle 9 erfüllen. Der notwendige Messbereich der Durchflussmessung entspricht den Werten in Tabelle 10. Das Messgerät in Prozesspunkt 15 besitzt im Vergleich zu den anderen Durchflussmesspunkten

5 Erstellung des Messkonzepts

den geringsten Durchfluss. Die maximale Messgenauigkeit sollte sich im Bereich von etwa 2 % des Messwertes bewegen und das Messgerät sollte eine hohe Reproduzierbarkeit und Zuverlässigkeit besitzen.

Tabelle 9: *Temperaturen und Drücke der Prozesspunkte 15 und 22*

Punkt	$T_{\min} / ^\circ\text{C}$	$T_{\text{norm}} / ^\circ\text{C}$	$T_{\max} / ^\circ\text{C}$	p_{\min} / bar	$p_{\text{norm}} / \text{bar}$	p_{\max} / bar
15	14,0	14,1	25,0	49,0	49,7	55,0
22	-3,5	-3,0	25,0	31,7	32,2	40,0

Tabelle 10: *Durchflüsse und Phasenzustände der Prozesspunkte 15 und 22*

Punkt	$\dot{m}_{\min} / \frac{\text{kg}}{\text{s}}$	$\dot{m}_{\text{norm}} / \frac{\text{kg}}{\text{s}}$	$\dot{m}_{\max} / \frac{\text{kg}}{\text{s}}$	Phasenzustand
15	0,0	0,065	0,080	Gas
22	0,0	0,037	0,400	Flüssigkeit

Prozesspunkte 5 und 7 - Transkritische Kältemittelverteilung EXP/EJE

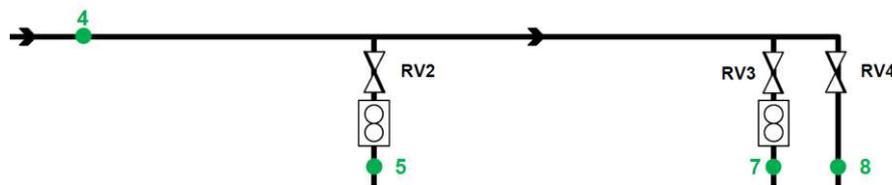


Abbildung 25: *Detailansicht Prozesspunkte 5, 7 und 8*

Vom WTP und dem Heizelement H her kommend (Prozesspunkt 4) teilt sich der Kältemittelstrom, abhängig vom jeweiligen Betriebszustand wie in Kapitel 4 beschrieben, in drei Stränge auf. Der Bypassstrang mit Prozesspunkt 8 wird nur im Anfahrbetrieb benutzt, dabei werden die Stränge des EJE und des EXP nicht befahren. Da der gesamte Durchfluss im Anfahrbetrieb über den Prozesspunkt 8 strömt, ist hier keine eigene Durchflussmessung notwendig, da der Gesamtdurchfluss in Prozesspunkt 1 bereits gemessen wird. Im laufenden Betrieb wird der Massenstrom auf die Stränge des EXP mit Prozesspunkt 5 und des EJE mit Prozesspunkt 7 aufgeteilt. Geregelt wird der Massenstrom hier voraussichtlich über die Öffnung der Regelventile RV2 und RV3. Zur Kalibrierung, Vermessung und Erprobung der einzelnen Komponenten im Prototypenbetrieb (insbesondere EJE und EXP) würde prinzipiell abermals die Gesamtdurchflussmessung in Prozesspunkt 1 genügen, da der erste Schritt im Prototypenbetrieb das einzelne Befahren der Stränge sein könnte. Im Idealfall ergeben sich dadurch Zusammenhänge zwischen Leistung des EJE und EXP, des Öffnungsgrades der Ventile RV2 und RV3 sowie des entsprechenden Durchflusses über die Einbauteile. Dieses Wissen ist speziell in diversen Mischbetrieben notwendig. Die Durchflussmessung in den beiden Strängen scheint also nicht zwingend notwendig.

Dennoch ist die Durchflussmessung in den **Prozesspunkten 5** und **7** aus mehreren Gründen sinnvoll. Die direkte Messung der Durchflüsse ist genauer als die Errechnung aus Größen wie der Leistung oder dem Ventilöffnungsgrad. Die Messung kann auch dazu verwendet werden, die Berechnungs- und Simulationsergebnisse im Prototypenbetrieb zu validieren, um in einem möglichen zukünftigen Serienprozess auf diese Messgeräte verzichten zu können. Die angestrebte Regelung des Durchflusses mittels der Regelventile RV2 und RV3 profitiert bei der Parametrisierung ebenfalls von der direkten Durchflussmessung, speziell in den angesprochenen Mischzuständen.

Die Erforschung und genaue Beobachtung des EJE als relativ unbekanntes Bauteil sollte ebenfalls im Fokus der zukünftigen Prototypenphase stehen. Eine wichtige Kenngröße für die tatsächliche Performance eines Ejektors ist das Massenstromverhältnis Φ_m , welches neben dem Saugmassenstrom \dot{m}_{sm} auch den Treibmassenstrom \dot{m}_{tm} benötigt [56]. Dieser Treibmassenstrom \dot{m}_{tm} wird durch die Durchflussmessung im Punkt 7 für jeden Zeitpunkt im Betrieb direkt bestimmt.

$$\Phi_m = \frac{\dot{m}_{sm}}{\dot{m}_{tm}} \quad (15)$$

Die Vermessung dieser beiden Punkte ist messtechnisch eine große Herausforderung, da wie in Tabelle 12 ersichtlich ein transkritischer Phasenzustand vorherrscht. Wie in Kapitel 2.1.4 beschrieben, entspricht dieser Zustand weder klar dem flüssigen noch dem gasförmigen Zustand. Zusätzlich dazu müssen die Messgeräte mit dem relativ hohen Druckniveau nach Tabelle 11 zurechtkommen. Bei diesen Punkten gibt es keine klaren Anforderungen an eine maximale Messungenauigkeit, da die Messpunkte wie beschrieben nicht zwingend für den Betrieb notwendig sind. Die primäre Herausforderung ist hier eher die Frage, ob und wie eine Messung möglich ist. Die Auseinandersetzung mit der Messgenauigkeit ist nur sekundär. Eine entsprechende Zuverlässigkeit und Reproduzierbarkeit sowie eine Messungenauigkeit im niedrigen Prozentbereich des Messwertes sind hier dennoch Anforderungen an die Messung. Eine automatische Dichtemessung zusätzlich zur Durchflussmessung könnte hier aufgrund des spannenden Phasenzustandes und der dort vorherrschenden Wichtigkeit der Dichte ebenfalls von Vorteil sein.

Tabelle 11: *Temperaturen und Drücke der Prozesspunkte 5 und 7*

Punkt	$T_{min} / ^\circ C$	$T_{norm} / ^\circ C$	$T_{max} / ^\circ C$	p_{min} / bar	p_{norm} / bar	p_{max} / bar
5	25,0	130,0	150,0	124,9	127,0	140,0
7	25,0	130,0	150,0	124,6	127,0	140,0

Tabelle 12: *Durchflüsse und Phasenzustände der Prozesspunkte 5 und 7*

Punkt	$\dot{m}_{min} / \frac{kg}{s}$	$\dot{m}_{norm} / \frac{kg}{s}$	$\dot{m}_{max} / \frac{kg}{s}$	Phasenzustand
5	0	1,55	1,70	transkritische Phase
7	0	0,45	0,50	transkritische Phase

Prozesspunkt 24 - Saugstrom Ejektor

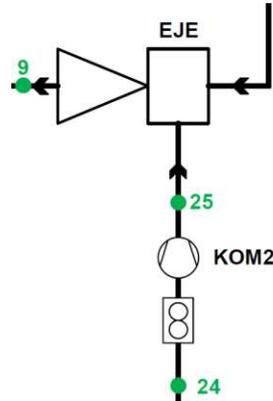


Abbildung 26: Detailansicht Prozesspunkt 24

Eine Durchflussmessung im **Prozesspunkt 24** ist für den Prozess nicht zwingend notwendig, bringt jedoch abermals Vorteile mit sich. Mithilfe dieser Messung könnte der Kältemitteldurchsatz durch den Niederdruck-Kältekreis gemessen werden. Da jedoch bereits in Prozesspunkt 18 eine Messung des Durchflusses vorgesehen ist, wird dieser Kältemitteldurchsatz bereits zu jedem Zeitpunkt gemessen und eine zusätzliche Messung ist nicht mehr zwingend notwendig. Diese zusätzliche Messung wäre für die Performance-messung und Untersuchung des Ejektors im Betrieb nützlich, da der Saugmassenstrom \dot{m}_{sm} für Gleichung (15) fast unmittelbar vor dem Bauteil bestimmt werden würde. Die Messung ist voraussichtlich für keine Regelungsaufgabe notwendig und dient reinen Monitoringzwecken.

Das Messgerät muss die Temperatur- und Druckanforderungen aus Tabelle 13 erfüllen und für die Messung der Durchflüsse aus Tabelle 14 geeignet sein. Aufgrund der Situierung des Prozesspunktes direkt nach dem Niederdrucksammler mit entsprechender Flüssigkeitsrückführung sollte der gasförmige Phasenzustand konstant vorherrschen. Die Gründe für eine Messung in Prozesspunkt 24 statt 25 sind das niedrigere Druckniveau vor dem KOM2 sowie die in Kapitel 5.2.2 beschriebene zu präferierende Situierung von Messgeräten in der Saugseite von Verdichtern (Kompressoren wie Pumpen). Die Messungenauigkeit sollte maximal 2 % des Messwertes betragen, um die zusätzliche Messung zu rechtfertigen.

Tabelle 13: Temperaturen und Drücke des Prozesspunktes 24

Punkt	$T_{min} / ^\circ\text{C}$	$T_{norm} / ^\circ\text{C}$	$T_{max} / ^\circ\text{C}$	p_{min} / bar	p_{norm} / bar	p_{max} / bar
24	-3,5	6,9	25,0	31,7	32,2	40,0

Tabelle 14: Durchflüsse und Phasenzustand des Prozesspunktes 24

Punkt	$\dot{m}_{\min} / \frac{\text{kg}}{\text{s}}$	$\dot{m}_{\text{norm}} / \frac{\text{kg}}{\text{s}}$	$\dot{m}_{\max} / \frac{\text{kg}}{\text{s}}$	Phasenzustand
24	0	0,37	0,40	Gas

5.2.3 Messstellen und Anforderungen der Temperatur- und Druckmessung

Wie in Kapitel 3 beschrieben, sind die Messungen von Temperatur und Druck die häufigsten Messaufgaben in der Prozesstechnik. Das Wissen über diese beiden Größen ist essenziell für das Verständnis der genauen physikalischen Vorgänge in der Anlage. Diese Arbeit und das daraus entstehende Messkonzept sollen als Grundlage für die Erstellung einer detaillierten Regelungsstrategie und für den tatsächlichen Bau eines Prototyps des Prozesses dienen. Die verbaute Messtechnik hat also primär zwei Aufgaben. Zum einen soll sie für unterschiedlichste Regelungsaufgaben vorbereitet sein und zum anderen soll sie Daten für die genaue Analyse des Prototypenbetriebes sammeln und bereitstellen. Ob der primäre Fokus der jeweiligen Temperatur- und Druckmessung im späteren Prototypenbetrieb der Regelung oder dem Monitoring gilt, wird für alle Prozesspunkte einzeln nachfolgend bearbeitet. Dass eine Messung der beiden Größen in allen Prozesspunkten zumindest mit geringen Messanforderungen durchgeführt werden soll, ist in enger Abstimmung mit den Projektpartnern beschlossen worden. Dies ist in erster Linie durch den Forschungscharakter des späteren Prototyps argumentierbar. Speziell die Ein- und Ausgangsgrößen der Hauptkomponenten der Anlage sollen für den späteren Forschungsbetrieb jedenfalls gemessen werden. Den beiden unterschiedlichen Beweggründen für die Messung folgen unterschiedlich hohe Messanforderungen und eventuell die Notwendigkeit unterschiedlicher Messgeräte. Dient ein Messpunkt primär dem Monitoring, wird diesem nachfolgend eine standardmäßige oder hohe Messanforderung zugeschrieben. Ist die Größe eine vermutliche Regelgröße des späteren Betriebes oder wird anderweitig für die Regelung benötigt, werden die Anforderungen mit hoch oder sehr hoch beschrieben. Die Anforderungsgrade und der voraussichtliche primäre Nutzen der Messung je Messstelle sind in den Tabellen 16 bis 40 aufgelistet.

Ob die Regelung eines beliebigen Einbauteiles bestimmte Sensoren benötigt, ist natürlich stark von der gewählten Type des Einbauteiles abhängig. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit sind viele Pumpen- und Kompressorentypen, sowie der genaue EJE und EXP noch nicht final festgelegt. Deshalb erfolgen die Beschreibung und Auswahl der Messtechnik im Allgemeinen so, dass die wahrscheinlichsten Regelungsoptionen geschaffen werden, damit das Messkonzept ideal auf spätere Regelungskonzepte vorbereitet ist.

In Tabelle 15 sind die im Prozess zu erwartenden Temperaturen und Drücke angeführt.

Tabelle 15: Temperaturen und Drücke sämtlicher Prozesspunkte

Punkt	T_{\min} / °C	T_{norm} / °C	T_{\max} / °C	p_{\min} / bar	p_{norm} / bar	p_{\max} / bar
1	14,0	14,1	25,0	48,9	49,7	55,0
2	14,6	24,7	25,0	19,7	127,0	140,0
3	25,0	130,0	130,0	126,4	127,0	140,0
4	25,0	130,0	150,0	125,8	127,0	140,0
5	25,0	130,0	150,0	124,9	127,0	140,0
6	25,0	91,3	150,0	79,0	79,6	140,0
7	25,0	130,0	150,0	124,6	127,0	140,0
8	25,0	130,0	150,0	124,6	127,0	140,0
9	25,0	86,1	150,0	79,0	79,1	140,0
10	25,0	89,5	150,0	78,8	79,1	87,0
11	25,0	89,5	150,0	78,4	79,1	87,0
12	25,0	88,2	150,0	78,1	79,1	87,0
13	15,0	18,2	25,0	77,8	79,1	87,0
14	14,0	14,1	25,0	49,7	49,7	55,0
15	14,0	14,1	25,0	49,0	49,7	55,0
16	25,0	49,7	60,0	49,0	79,1	88,0
17	14,0	14,1	25,0	49,7	49,7	55,0
18	14,0	14,1	25,0	49,0	49,7	55,0
19	-3,5	-3,0	25,0	31,7	32,2	40,0
20	-3,5	-3,0	25,0	31,7	32,2	40,0
21	-3,5	6,9	25,0	31,7	32,2	40,0
22	-3,5	-3,0	25,0	31,7	32,2	40,0
23	-3,5	-3,0	25,0	32,0	32,5	40,0
24	-3,5	6,9	25,0	31,7	32,21	40,0
25	25,0	53,2	60,0	65,0	65,1	75,0

Prozesspunkt 1

Die Druckmessung in diesem Prozesspunkt kann zur Regelung der HP herangezogen werden, da sie für die Differenzdruckbildung über die HP notwendig ist. Über die Druck- und Temperaturmessung kann der Eingangszustand der Pumpe klar einem Phasenzustand zugeordnet werden, solange sich dieser nicht im Nassdampfgebiet/Zweiphasengebiet befindet. Der Druck kann ebenfalls als Regelgröße für das RV1 dienen.

Tabelle 16: Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 1

Größe	Voraussichtlicher primärer Nutzen	Anforderungen
Temperatur T	Monitoring	Standard
Druck p	Regelung	Hoch

Prozesspunkt 2

Die HP kann auf einen konstanten Ausgangsdruck geregelt werden. Dieser Ausgangsdruck legt viele Bedingungen im gesamten Prozessverlauf fest und hat daher einen großen Einfluss auf den Gesamtprozess. Die Temperatur- und Druckmessung definiert gleichzeitig den Eingangszustand in den WTp. Die Ein- und Ausgangszustände der Hauptkomponenten sollen, wie zu Beginn dieses Kapitel definiert, zwingend bestimmt werden können.

Tabelle 17: Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 2

Größe	Voraussichtlicher primärer Nutzen	Anforderungen
Temperatur T	Monitoring	Standard
Druck p	Regelung	Hoch

Prozesspunkt 3

Die Ausgangstemperatur aus dem WTp dient als Regelgröße für die Pumpe und anderweitige Regelungseinrichtungen im Sek₁. Der Druck muss wieder für die Bestimmung des vollständigen Ausgangszustandes aus dem WT gemessen werden.

Tabelle 18: Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 3

Größe	Voraussichtlicher primärer Nutzen	Anforderungen
Temperatur T	Regelung	Hoch
Druck p	Monitoring	Standard

Prozesspunkt 4

Das elektrische Heizelement soll das Temperaturniveau vom WTp her kommend abermals erhöhen und kann auf dessen Ausgangstemperatur im Prozesspunkt 4 geregelt werden. Der Druck soll zur genauen Bestimmung der Druckverluste und zum Monitoring gemessen werden.

Tabelle 19: Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 4

Größe	Voraussichtlicher primärer Nutzen	Anforderungen
Temperatur T	Regelung	Hoch
Druck p	Monitoring	Standard

Prozesspunkt 5

Der Prozesspunkt 5 stellt den Eingangszustand in den EXP dar. Der Eingangsdruck ist für die Regelung des EXP eine wichtige Größe, da dieser das Kältemittel nur um einen bestimmten Druckwert entspannen kann. Der Druck dieses Punktes ist ebenfalls eine vermeintliche Regelgröße für das RV2. Zur genauen Untersuchung des EXP ist auch die Eingangstemperatur von Relevanz.

Tabelle 20: Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 5

Größe	Voraussichtlicher primärer Nutzen	Anforderungen
Temperatur T	Monitoring	Standard
Druck p	Regelung	Hoch

Prozesspunkt 6

Der Prozesspunkt 6 stellt den Ausgangszustand aus dem EXP dar. Der Ausgangsdruck ist für die Regelung des EXP eine wichtige Größe, da dieser das Kältemittel nur um einen bestimmten Druckwert entspannen kann. Zur genauen Untersuchung des EXP ist auch die Ausgangstemperatur von Relevanz.

Tabelle 21: Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 6

Größe	Voraussichtlicher primärer Nutzen	Anforderungen
Temperatur T	Monitoring	Standard
Druck p	Regelung	Hoch

Prozesspunkt 7

Der Prozesspunkt 7 stellt die Treibseite des EJE dar. Da der EJE als Bauteil und Ersatz für den klassischen elektromechanischen Verdichter im Kältekreis in der Prototypenphase einen spannenden Untersuchungsgegenstand darstellt, sind sämtliche Messpunkte nahe des EJE mit hohen Messanforderungen verbunden. Ob der verwendete EJE diese Größen auch zur Regelung benötigt, ist von dessen Bauform und Typ abhängig und zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit noch nicht bekannt. So beschreibt beispielsweise P. Noeres [1] den treibseitigen Druck des EJE als wichtige Regelgröße. Der Druck dieses Punktes ist jedenfalls eine vermeintliche Regelgröße für das RV3.

Tabelle 22: Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 7

Größe	Voraussichtlicher primärer Nutzen	Anforderungen
Temperatur T	Monitoring	Hoch
Druck p	Regelung	Hoch

Prozesspunkt 8

Der BYP ist nur für den Anfahrbetrieb notwendig. Da dieser Betriebszustand in der Entwicklung des Prozesses die meisten Fragen aufgeworfen hat, ist hier erneut eine Vermessung des Prozesspunktes, trotz der Messungen im Prozesspunkt 4, vorgesehen. Bei der konkreten Umsetzung des Prototyps ist auf die Anzahl der verwendeten Einbauteile und die Rohrlängen des BYP zu achten und neu zu erwägen, ob eine Messung im Prozesspunkt 8 tatsächlich notwendig ist. Das RV4 wird vermutlich auf den Druck in diesem Punkt geregelt. Ob das RV4 und eine entsprechende Regelung dessen tatsächlich

notwendig sind, konnte zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit noch nicht final geklärt werden.

Tabelle 23: *Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 8*

Größe	Voraussichtlicher primärer Nutzen	Anforderungen
Temperatur T	Monitoring	Standard
Druck p	Regelung	Hoch

Prozesspunkt 9

Der Prozesspunkt 9 stellt die Ausgangsseite des EJE dar. Sämtliche Messpunkte nahe des EJE sind mit einer hohen Messanforderung verbunden, da der EJE als Bauteil und Ersatz für den klassischen elektromechanischen Verdichter im Kältekreis einen wichtigen Untersuchungsgegenstand in der Prototypenphase darstellt. Ob der zukünftig verwendete EJE diese Größen auch zur Regelung benötigt, ist von dessen Bauform und Typ abhängig und zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit noch nicht bekannt. Es ist jedoch davon auszugehen, dass der Druck in diesem Punkt eine Regelgröße für den EJE darstellt.

Tabelle 24: *Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 9*

Größe	Voraussichtlicher primärer Nutzen	Anforderungen
Temperatur T	Monitoring	Hoch
Druck p	Regelung	Hoch

Prozesspunkt 10

Der Druck im Prozesspunkt 10 stellt voraussichtlich die Regelgröße des RV5, RV6 und RV7 dar. Ob das RV6 und die dazugehörige Regelung dessen zusätzlich zum RV4 überhaupt notwendig sind, konnte zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit noch nicht final geklärt werden. Bei Prozesspunkt 10 könnte eine Aufsplittung dessen in drei einzelne Messpunkte, jeweils direkt hinter den RV notwendig sein, abhängig von der tatsächlichen Umsetzung des Anfahrbetriebs. Dieser Punkt stellt einen sehr interessanten Mischpunkt für die Untersuchungen in der Prototypenphase dar. Die Temperaturmessung dient hier reinen Monitoringzwecken.

Tabelle 25: *Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 10*

Größe	Voraussichtlicher primärer Nutzen	Anforderungen
Temperatur T	Monitoring	Standard
Druck p	Regelung	Hoch

Prozesspunkt 11

Der Druck im Prozesspunkt 11 kann als Regelgröße sowohl für das RV8 als auch für den KOM1 der Gasrückführung fungieren. Der KOM1 muss den rückzuführenden Kältemit-

telstrom in Abhängigkeit dieses Druckwertes verdichten. Die Temperatur dient abermals reinen Monitoring- und Untersuchungszwecken.

Tabelle 26: *Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 11*

Größe	Voraussichtlicher primärer Nutzen	Anforderungen
Temperatur T	Monitoring	Standard
Druck p	Regelung	Hoch

Prozesspunkt 12

Dies ist der Eingangszustand in den GK, welcher für die Regelung des Kältekreises eine wichtige Rolle spielt. Wie in Tabelle 4 angeführt, sind der Druck im GK und die Unterkühlung nach dem GK mögliche für die Regelung relevante Größen. Dass die Phase vor dem GK im Normbetrieb transkritisch ist, jedoch sehr nahe an den Phasengrenzen liegt, ist ein weiteres Argument für eine erhöhte Messanforderung. Das dritte Argument, diesen Prozesspunkt detaillierter zu vermessen, ist wieder der noch nicht final definierte Anfahrzustand, indem der Zustand des Kältemittels ungewollte Werte annehmen könnte.

Tabelle 27: *Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 12*

Größe	Voraussichtlicher primärer Nutzen	Anforderungen
Temperatur T	Regelung	Sehr Hoch
Druck p	Regelung	Sehr Hoch

Prozesspunkt 13

Der Druck nach dem GK und die Temperatur nach dem GK sind nach Tabelle 4 wichtige Regelgrößen für vergleichbare Prozesse. Das DV2, welches die Rolle des Expansionsventiles im Kältekreis einnimmt, könnte diese Größen als Regelgrößen verwenden. Das kritische Phasengebiet und der Anfahrzustand sind wie bei Prozesspunkt 12 weitere Argumente für eine besonders hohe Anforderung an die Messung. Wie in Tabelle 4 aufgelistet, kann auch der Druckverlust über das DV1 als Regelgröße verwendet werden.

Tabelle 28: *Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 13*

Größe	Voraussichtlicher primärer Nutzen	Anforderungen
Temperatur T	Regelung	Sehr hoch
Druck p	Regelung	Sehr hoch

Prozesspunkt 14

Das DV1, das für das notwendige Druck- und Temperaturniveau im MS sorgt, um die gewünschte Phase bereitzustellen, regelt auf den temperaturabhängigen Druck in diesem Prozesspunkt. Die danach im Sammler stattfindende Phasentrennung ist essenziell für

5 Erstellung des Messkonzepts

den Betrieb des Prozesses. Wie in Tabelle 4 aufgelistet, kann auch der Druckverlust über das DV1 als Regelgröße verwendet werden.

Tabelle 29: *Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 14*

Größe	Voraussichtlicher primärer Nutzen	Anforderungen
Temperatur T	Regelung	Sehr hoch
Druck p	Regelung	Sehr hoch

Prozesspunkt 15

Die Druckmessung in diesem Prozesspunkt kann zur Regelung des KOM1 herangezogen werden, da sie für die Differenzdruckbildung über den KOM1 notwendig ist. Über die Druck- und Temperaturmessung kann der Eingangszustand in den Kompressor klar einem Phasenzustand zugeordnet werden, solange sich dieser nicht im Nassdampfgebiet/Zweiphasengebiet befindet. Das Nichtvorhandensein eines Nassdampfgebietes wird über den MS sichergestellt. Ein entsprechendes Monitoring dieser Größen ist dennoch definitiv sinnvoll.

Tabelle 30: *Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 15*

Größe	Voraussichtlicher primärer Nutzen	Anforderungen
Temperatur T	Monitoring	Standard
Druck p	Regelung	Hoch

Prozesspunkt 16

Um die Gasrückführung vor dem GK durch den KOM1 sicherzustellen, könnte die Regelung des Druckes im Prozesspunkt 16 in Abhängigkeit des Druckes im Prozesspunkt 11 notwendig sein. Da die Größen dieses Fluidstromes direkt den Eingangszustand in den GK mitbestimmt, muss hier ebenfalls die Temperatur gemessen werden.

Tabelle 31: *Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 16*

Größe	Voraussichtlicher primärer Nutzen	Anforderungen
Temperatur T	Monitoring	Standard
Druck p	Regelung	Hoch

Prozesspunkt 17

Der Zustand der nutzbaren Phase aus dem MS soll durch die Druck- und Temperaturmessung in diesem Punkt bestimmt werden und dient reinen Monitoringzwecken.

Tabelle 32: Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 17

Größe	Voraussichtlicher primärer Nutzen	Anforderungen
Temperatur T	Monitoring	Standard
Druck p	Monitoring	Standard

Prozesspunkt 18

Wie bei Prozesspunkt 13 beschrieben, ist der Zustand nach dem GK eine wichtige Regelgröße bei klassischen Kältekreisen. Im Unterschied zum klassischen Kältekreis sind zwischen dem DV2 und dem GK einige weitere Einbauteile verbaut und so herrscht vor dem DV2 ein deutlich anderes Temperatur- und Druckniveau als in einem klassischen Kältekreis. Die Regelung des DV2 könnte in Zukunft also alternativ zu den Größen in Punkt 13 auch die Größen in Punkt 18 berücksichtigen.

Tabelle 33: Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 18

Größe	Voraussichtlicher primärer Nutzen	Anforderungen
Temperatur T	Regelung	Hoch
Druck p	Regelung	Hoch

Prozesspunkt 19

Der Druck in Prozesspunkt 19 ist, analog zu Prozesspunkt 11, eine mögliche Regelgröße der P2 der Flüssigkeitsrückführung vor den VD. Die Temperatur soll zur Überwachung gemessen werden.

Tabelle 34: Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 19

Größe	Voraussichtlicher primärer Nutzen	Anforderungen
Temperatur T	Monitoring	Standard
Druck p	Regelung	Hoch

Prozesspunkt 20

Dies ist der Eingangszustand in den VD, welcher für die Regelung des Kältekreises eine wichtige Rolle spielt. Wie in Tabelle 4 angeführt, sind der Druck im VD und die Überhitzung nach dem Verdampfer mögliche Regelgrößen des Prozesses. Eine Bestimmung dieser Überhitzung ist nach D. Paczona [7] durch die Messung der Temperatur vor und nach dem VD möglich. Weiters bewegt sich die Phase vor dem VD im Normbetrieb nahe an den Phasengrenzen bzw. im Zweiphasengebiet, was eine erhöhte Messanforderung bedingt.

Tabelle 35: Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 20

Größe	Voraussichtlicher primärer Nutzen	Anforderungen
Temperatur T	Regelung	Hoch
Druck p	Regelung	Hoch

Prozesspunkt 21

Der Druck und die Temperatur nach dem VD sind nach Tabelle 4 wichtige Regelgrößen für vergleichbare Prozesse. Das DV2, das die Rolle des Expansionsventiles im Kältekreis einnimmt, könnte diese Größen als Regelgrößen verwenden. Das kritische Phasengebiet ist wieder ein Grund für hohe Anforderung an die Messung.

Tabelle 36: Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 21

Größe	Voraussichtlicher primärer Nutzen	Anforderungen
Temperatur T	Regelung	Hoch
Druck p	Regelung	Hoch

Prozesspunkt 22

Die Druckmessung in diesem Prozesspunkt kann zur Regelung der P2 herangezogen werden, da sie für die Differenzdruckbildung über die P2 notwendig ist. Über die Druck- und Temperaturmessung kann der Eingangszustand in die Pumpe klar einem Phasenzustand zugeordnet werden, solange sich dieser nicht im Nassdampfgebiet/Zweiphasengebiet befindet. Das Nichtvorhandensein eines Nassdampfgebietes wird über den NS sichergestellt. Ein entsprechendes Monitoring dieser Größen ist dennoch definitiv sinnvoll.

Tabelle 37: Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 22

Größe	Voraussichtlicher primärer Nutzen	Anforderungen
Temperatur T	Monitoring	Standard
Druck p	Regelung	Hoch

Prozesspunkt 23

Um die Flüssigkeitsrückführung vor den VD durch die P2 sicherzustellen, könnte die Regelung des Druckes im Prozesspunkt 23 in Abhängigkeit des Druckes im Prozesspunkt 19 notwendig sein. Da die Größen dieses Fluidstromes direkt den Eingangszustand in den VD mitbestimmt, muss hier ebenfalls die Temperatur gemessen werden.

Tabelle 38: Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 23

Größe	Voraussichtlicher primärer Nutzen	Anforderungen
Temperatur T	Monitoring	Standard
Druck p	Regelung	Hoch

Prozesspunkt 24

Dies ist der Ausgangszustand der gasförmigen nutzbaren Phase aus dem NS. Der Druck dieses Punktes kann als Regelgröße für den KOM2 dienen, da dieser für die Differenzdruckbildung über den Kompressor notwendig ist. Der Sammler sollte eine festgesetzte konstant gasförmige Phase sicherstellen, dennoch ist eine Überwachung der Temperatur zusätzlich zum Druck sinnvoll.

Tabelle 39: Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 24

Größe	Voraussichtlicher primärer Nutzen	Anforderungen
Temperatur T	Monitoring	Standard
Druck p	Regelung	Hoch

Prozesspunkt 25

Der KOM2 wird voraussichtlich auf einen konstanten Ausgangsdruck geregelt, da der EJE ein bestimmtes vorgegebenes Druckniveau auf der Saugseite im Prozesspunkt 25 benötigt. Da der EJE als Bauteil und Ersatz für den klassischen elektrischen Verdichter im Kältekreis in der Prototypenphase einen spannenden Untersuchungsgegenstand darstellt, sind sämtliche Messpunkt nahe des EJE mit hohen Messanforderungen verbunden. Ob der verwendete EJE diese Größen auch zur Regelung benötigt, ist von dessen Bauform und Typ abhängig und zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit noch nicht bekannt.

Tabelle 40: Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 25

Größe	Voraussichtlicher primärer Nutzen	Anforderungen
Temperatur T	Monitoring	Standard
Druck p	Regelung	Hoch

5.2.4 Messstellen und Anforderungen der Füllstandsmessung

In den beiden Sammlern nach dem GK - dem **Mitteldrucksammler MS** - und nach dem VD - dem **Niederdrucksammler NS** - ist eine Füllstandsmessung notwendig. Die entsprechenden Temperaturen und Drücke in den Sammlern entsprechen den Eingangsparametern in die Sammler - Prozesspunkt 14 für den MS und Prozesspunkt 21 für den NS - und sind in Tabelle 41 angeführt. Die Messsysteme müssen diesen Temperaturen und Drücken standhalten. Neben dem Nutzen als Ausdehnungsgefäß ist die primäre Aufgabe der Behälter die klare Trennung der flüssigen und gasförmigen Phase. Beim Eintritt in den Sammler sind Zweiphasengemische nicht auszuschließen. Um zu garantieren, dass aus der oben angeschlossenen Leitung nur gasförmiges und aus der unten angeschlossenen Leitung nur flüssiges Kältemittel austritt ist eine Überwachung des Füllstandes in den Sammlern notwendig. Aufgabe dieser Messung ist es, das zu weite Absinken oder Anheben der Grenze zwischen Flüssigkeit und Gas zu verhindern. Dafür muss die Füllstandsmessung in die Regelung miteingebunden werden. Realisiert werden kann solch eine Überwachung durch die Verwendung zweier Grenzstandmessungen des Flüssigkeitspegels. Diese Grenzstandsmessgeräte, angebracht bei beispielsweise 10 % und 90 % der Füllhöhe der Sammler

abhängig von der Lage der Anschlüsse, geben Aufschluss darüber, ob sich der Niveaupegel der Flüssigkeit im Sammler zwischen diesen definierten Grenzen befindet. Sollte das Flüssigkeitsniveau über oder unter diese Grenze sinken, reagieren die entsprechenden Pumpen und Kompressoren, um dies auszugleichen. Die Füllstandsmessung dient also nicht als permanente Regelgröße, sondern liefert zwei Überwachungs- bzw. Grenzgrößen. Eine örtlich detailliertere Messung des Füllstandniveaus ist für diese Aufgabe voraussichtlich nicht notwendig. Wichtig ist, dass die Füllstandsmessung nicht als kontinuierliche Regelgröße (siehe Tabelle 4) verwendet werden kann.

Die Aufgabe der Füllstandsmessung ist es also, das Trockenlaufen der Pumpen, bzw. das Nasslaufen der Kompressoren nach den Sammlern zu verhindern, um so diese Einbauteile vor Beschädigung zu schützen. Eine sehr hohe Zuverlässigkeit sowie Genauigkeit ist für diese Messung vorauszusetzen. Da die Sammler mit höchster Wahrscheinlichkeit Eigenanfertigungen des Projektpartners Firma Edtmayer Systemtechnik sein werden, müssen die Füllstandsmessgeräte leicht und praktisch einzubauen und möglichst robust in deren Handhabung sein.

Tabelle 41: *Temperaturen und Drücke in den beiden Sammlern (MS & NS)*

	$T_{\min} / ^\circ\text{C}$	$T_{\text{norm}} / ^\circ\text{C}$	$T_{\max} / ^\circ\text{C}$	p_{\min} / bar	$p_{\text{norm}} / \text{bar}$	p_{\max} / bar
MS	14,0	14,1	25,0	49,7	49,7	55,0
NS	-3,5	6,9	25,0	31,7	32,2	40,0

5.3 Auswahl der Messverfahren und Sensorik

In diesem Kapitel werden für die in Kapitel 5.2 beschriebenen Messstellen mit den entsprechenden Messanforderungen konkrete Sensoren und Messsysteme ausgewählt. Das gewählte Messverfahren und die entsprechende Type des Messgerätes ist ein Vorschlag, welcher auf den in dieser Arbeit beschriebenen Grundlagen, Betriebszuständen und Parametern beruht. Empfehlungen von Projektpartnern, Internetrecherchen sowie Gespräche mit Herstellern von Messsystemen sind die Basis für diese Vorschläge. Das bedeutet jedoch nicht, dass nicht auch andere Messgeräte für die entsprechenden Messaufgaben geeignet wären. Dennoch soll die intensive Auseinandersetzung mit dem Prozess und dessen Prozesspunkten in einen konkreten Konzeptvorschlag inklusive tatsächlich ausgewählter Sensorik gipfeln. Diese Sensoren sollen für die Errichtung des Prototyps verwendet werden können. Bei der Auswahl der Messsysteme wurde speziell auf den Bau und Betrieb des Prototyps geachtet. Systeme, welche für den Prototyp und dessen Forschungsbetrieb ideal geeignet sind, können für den späteren Serienprozess unpassend oder nicht sinnvoll sein. Eine Reevaluierung ist zu gegebener Zeit jedenfalls empfohlen.

5.3.1 Sensorik der Durchflussmessung

Bei der Auswahl des richtigen Durchflussmessverfahrens und in weiterer Folge des Messsystems ist auf einige Punkte zu achten. Die für die Auswahl notwendigen Informationen lassen sich in vier Unterkategorien einteilen [43][41]:

- **Beschaffenheit des Messmediums** wie bspw. Aggregatzustand und mögliche Zweiphasengemische, Dichte, Viskosität, elektrische Leitfähigkeit, chemische Aggressivität, mögliche Verschmutzungen
- **Betriebsbedingungen** wie bspw. Rohrnennweite, Fließrichtung, Strömungsverhältnisse bzw. Re-Zahl, Betriebsdruck und -temperatur, maximaler Druckverlust
- **örtliche Gegebenheiten** wie bspw. Vibrationen, Explosionsschutz, Einbauort, Umgebungstemperatur
- **Darstellung des Messwertes** wie bspw. Messgenauigkeit, Messbereich, Eichfähigkeit, örtliche Anzeige

Basierend auf der Gesamtheit dieser genannten notwendigen Informationen kann das geeignete Durchflussmessverfahren für den jeweiligen Anwendungsfall ausgewählt werden. Die Auswahl des Durchflussmessverfahrens erfolgte aufgrund des Forschungscharakters des Prototyps größtenteils durch die Diskussion mit Herstellern. Aufgrund der einfacheren Bestellung, Betreuung und dem Einbau durch den Hersteller sowie Handhabung im Betrieb wurden letztendlich sämtliche Durchflussmessgeräte von einem Hersteller ausgewählt.

Eine Vielzahl der zuvor aufgelisteten notwendigen Informationen wurde bereits in den Kapiteln 4 und 5.2 behandelt und definiert. Andere, bspw. die Eigenschaften des Messmediums CO₂ oder Rohrnennweiten und Fließgeschwindigkeiten, kamen direkt von den Herstellern der Messgeräte oder den Projektpartnern.

Die Eigenschaften des Messmediums CO₂ schließen einige vielversprechende Messverfahren zur Durchflussmessung von vornherein aus. Durchflussmesser, welche nach dem magnetisch-induktiven Prinzip funktionieren, siehe Kapitel 3.2.3, benötigen eine Mindestleitfähigkeit des zu messenden Mediums. Diese Anforderung erfüllt CO₂ nach Rücksprache mit einigen Herstellern nicht (bspw. H.J. Böck - Yokogawa, persönliche Kommunikation, 20.12.2023). Nicht ausgeschlossen, aber schwierig ist ebenfalls die Durchflussmessung mit einem Ultraschall-Durchflussmesser. Dafür verantwortlich ist die Eigenschaft der hohen Schalldämpfung von CO₂, was für die Ultraschallmessung speziell von außerhalb der Rohrleitung eine Herausforderung darstellt. Spannenderweise ist das oftmals hohe Druckniveau für die herausfordernde Ultraschall-Durchflussmessung scheinbar von Vorteil (P. Brunner - Flexim, persönliche Kommunikation, 02.08.2023). Im Allgemeinen stellt das hohe Druckniveau der meisten Messpunkte jedoch eher eine Herausforderung als eine Erleichterung für die Messung dar. Die oft entscheidenden Themen bei der folgenden Auswahl der Durchflussmessgeräte waren neben dem Druck das Temperaturniveau, der Phasenzustand sowie die zu messenden Durchflussmengen und die daraus folgenden Fließgeschwindigkeiten.

Jede Messstelle muss einzeln betrachtet und dafür individuell die Sensorik ausgewählt werden. Dennoch ist in der Literatur eine klare Tendenz hin zu einem einzelnen Messverfahren ausfindig zu machen. Vergleichbare Forschungsprojekte (bspw. [57], [50], [58], [59], [60]), also jene, die sich mit super- oder transkritischen CO₂ Prozessen auseinandersetzen, setzen fast immer auf eine Durchflussmessung nach dem Coriolis-Prinzip, siehe Kapitel 3.2.3. Der Austausch mit und die Produktpalette von namhaften Herstellern führten zum

selben Ergebnis. Die Coriolis-Durchflussmessung ist für den SETE-Prozess im aktuellen Layout am besten als Durchflussmessverfahren geeignet.

Prozesspunkte 1 und 18

Die Temperatur- und Druckerfordernungen, sowie der Phasenstatus der beiden Messpunkte sind nahezu ident. Der gravierende Unterschied liegt in der Durchflussmenge, welche gemessen werden soll. Die beiden ausgewählten Durchflussmessgeräte entstammen deshalb der gleichen Produktserie, unterscheiden sich jedoch in deren genauer Type.

Der Durchfluss in Prozesspunkt 1 wird mittels dem **Micro Motion F-Serie Coriolis Messsystem F100S** von **Emerson Process Management AG** gemessen. In Prozesspunkt 18 wird das **Micro Motion F-Serie Coriolis Messsystem F025S** vom selben Hersteller verwendet.



Abbildung 27: *Micro Motion Messsysteme der F-Serie [61]*

Das Messsystem basiert auf dem in Kapitel 3.2.3 beschriebenen Prinzip der Coriolis-Durchflussmessung. Sämtliche Hersteller, von denen ein konkretes Angebot eingeholt worden ist, empfehlen für diese beiden Messpunkte das verwendete Messverfahren.

Der große Vorteil dieses Messverfahrens liegt also in diesem Fall in der in Kapitel 5.2 beschriebenen Unabhängigkeit der Messung von vielen Messtoffeigenschaften und die dadurch mögliche Vermessung vieler Medien und Prozesszustände. Weiters empfiehlt sich das Messsystem und die ausgewählte Type durch die hohe Robustheit der Sensorausführung und die Langzeit-Zuverlässigkeit durch die Abwesenheit bewegter Teile. Der Hersteller wirbt mit stabilen Messungen, selbst unter hier vorkommenden anspruchsvollen Prozessbedingungen, sowie umfassenden Prüfungen des Messsystems bei Montage [61]. Ein klarer Nachteil sind die sehr hohen Anschaffungskosten des Messsystems. Die in den Tabellen 42 und 43 aufgelisteten Messgenauigkeiten werden durch eine entsprechende Kalibrierung des Systems gewährleistet und gelten für die Vermessung von Flüssigkeiten mittels der Typen F100S und F025S. Durch die Verwendung dieser Messsysteme ist eine zusätzliche Messung der Dichte neben der Messung des erforderlichen Durchflusses möglich. Diese ist wie in Kapitel 5.2 beschrieben eine wünschenswerte Messgröße. Ebenfalls beinhaltet das Messsystem eine Temperaturmessung, auf welche jedoch aufgrund der anderweitig verwendeten Sensorik nicht zurückgegriffen wird.

5 Erstellung des Messkonzepts

Tabelle 42: Allgemeine Arbeitsbereiche und Messabweichungen beider Messgeräte Micro Motion Type F100S und F025S bei der Messung von Flüssigkeiten [61]

Temperaturbereich	-100 bis 204 °C
max. Sensorbetriebsdruck	100 bar
max. Viskosität	0,0005 $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
Umgebungstemperatur	-40 bis 60 °C
Genauigkeit Massedurchfluss ³	0,2 %
Reproduzierbarkeit Massedurchfluss	0,10 %
Genauigkeit Dichtemessung	+/- 2 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Reproduzierbarkeit Dichtemessung	1 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Tabelle 43: Spezifische Arbeitsbereiche und Messabweichungen der Messgeräte Micro Motion Type F100S und F025S bei der Messung von Flüssigkeiten [61]

	PP 1 - F100S	PP 18 - F025S
Nenndurchfluss	5,42 $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	0,38 $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
Max. Durchfluss	9,08 $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	0,76 $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
Einfluss der Prozesstemperatur ⁴	+/- 0,0002 %	+/- 0,0007 %
Einfluss des Prozessdruckes ⁵	- 0,01885 %	keine Angabe

Der in Tabelle 42 angeführte Temperatur- und Druckbereich ist ausreichend für die in PP 1 und 18 vorherrschenden Bedingungen, siehe Tabelle 7. Auch die Anforderungen an die Umgebungstemperatur sollte bei den existierenden Prozesstemperaturen ohne Probleme eingehalten werden können. Die Viskosität des Messstoffes in den Prozesspunkten liegt im Größenbereich von $10^{-8} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ [62] und unterschreitet daher bei weitem die maximale Viskosität, die das Messsystem vorgibt. Die angeführte Genauigkeit der Massedurchflussmessung von 0,2 % unterschreitet deutlich die in 5.2.2 gesetzte Anforderung von 1%. Diese Genauigkeit gilt nur bei klar definierten Referenzbedingungen, siehe Datenblatt [61]. Die Änderung der Genauigkeit bei abweichenden Temperaturen und Drücken von den jeweiligen Kalibrierungsgrößen ist in Tabelle 43 angegeben. Durch eine entsprechende Kalibrierung und Nullpunkteinstellung des Messsystems können die Abweichungen der Genauigkeitswerte auch in der Praxis weitgehend korrigiert werden. Aufgrund der zu erwartenden sehr geringen Schwankungen dieser Größen werden diese Genauigkeitsänderungen geringen Einfluss auf die Gesamtgenauigkeit haben.

Der angegebene Nenndurchfluss definiert den Punkt, an dem das Messsystem bei Referenzbedingungen einen Druckabfall von ca. 1 bar verursacht.

Prozesspunkte 15 und 22

Diese beiden Prozesspunkte unterscheiden sich trotz deren gleicher Platzierung jeweils in der Phasenrückführung des GK sowie des VD in fast allen relevanten Größen: sowohl bei

³Angabe für Basisversion des Messgerätes - Reproduzierbarkeit, Linearität und Hysterese inkludiert

⁴Einheit: % des max. Massedurchfluss pro °C

⁵Einheit: % des Messwertes pro bar

5 Erstellung des Messkonzepts

den auftretenden Temperaturen, Drücken und Durchflüssen als auch in deren Phasenzuständen. Deswegen werden hier zwei verschiedene Messgerätetypen, welche jedoch auf demselben Messverfahren beruhen, ausgewählt.

Der Durchfluss in Prozesspunkt 15 wird mittels dem **Micro Motion F-Serie Coriolis Messsystem F025S** von **Emerson Process Management AG** gemessen. In Prozesspunkt 22 wird das **Micro Motion ELITE Coriolis Messsystem CMFS015M** vom selben Hersteller verwendet.

Die Messsysteme basieren, wie beim Messsystem der vorherigen Prozesspunkte 1 und 18 auf dem in Kapitel 3.2.3 beschriebenen Prinzip der Coriolis-Durchflussmessung. Abermals empfehlen sämtliche Hersteller, von denen ein konkretes Angebot eingeholt wurde, für diese beiden Messpunkte das verwendete Messverfahren.

Das Messgerät für **Prozesspunkt 15** ist dasselbe wie für Prozesspunkt 18, unterscheidet sich lediglich in dem zu messenden Phasenzustand des Mediums. Im Prozesspunkt 15 liegt das Messmedium, wie in Tabelle 10 angeführt, gasförmig vor. Im Prozesspunkt 18 ist es flüssig. Die prinzipiellen Vor- und Nachteile des Messverfahrens und speziell des Messsystems der Micro Motion F-Serie gleichen den bei Prozesspunkt 1 und 18 beschriebenen Argumenten. Aufgrund des anderen Phasenzustandes des Mediums ergeben sich bei der Durchflussmessung in Prozesspunkt 15 jedoch andere Messgenauigkeiten, welche in Tabelle 44 angeführt sind. Die angeführten Messgenauigkeiten werden durch eine entsprechende Kalibrierung des Systems gewährleistet. Das Messsystem beinhaltet eine zusätzliche Temperaturmessung, auf welche jedoch aufgrund der weiteren verwendeten Sensoren, nicht zurückgegriffen wird.

Tabelle 44: *Spezifische Arbeitsbereiche und Messabweichungen des Messgerätes Micro Motion Type F025S bei der Messung von Gasen [61]*

Temperaturbereich	-100 bis 204 °C
max. Sensorbetriebsdruck	100 bar
max. Viskosität	0,0005 $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
Umgebungstemperatur	-40 bis 60 °C
Genauigkeit Massedurchfluss ⁶	+/- 0,50 %
Reproduzierbarkeit Massedurchfluss	0,25 %
Nenndurchfluss	0,357 $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
max. Durchfluss	0,535 $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
Einfluss der Prozesstemperatur ⁷	+/- 0,0007 %
Einfluss des Prozessdruckes	keine Angabe

Der in Tabelle 44 angeführte Temperatur- und Druckbereich ist ausreichend für die in Prozesspunkt 15 vorherrschenden Bedingungen, siehe Tabelle 9. Auch die Bedingungen an die Umgebungstemperatur sollte bei den existierenden Prozesstemperaturen ohne Probleme eingehalten werden können. Die angeführte Viskositätsgrenze wird im Prozesspunkt,

⁶Angabe für Basisversion des Messgerätes - Reproduzierbarkeit, Linearität und Hysterese inkludiert

⁷Einheit: % des max. Massedurchfluss pro °C

5 Erstellung des Messkonzepts

bei dem die Viskosität in der Größenordnung von $10^{-8} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ [62] liegt, bei weitem nicht überschritten. Die Messungenauigkeit ist bei der Messung gasförmiger Medien mit einer generellen Messabweichung von 0,5 % deutlich höher als bei der Messung flüssiger Medien, wo die Messabweichung nur 0,2 % beträgt. Dennoch erfüllt die Messung die in Kapitel 5.2.2 gesetzte Anforderung von einer maximalen Messabweichung von 2 % mehr als deutlich. Die Erreichung der Genauigkeit war bei der Auswahl des Durchflussmesssystems nicht der entscheidende Faktor, sondern die Zusage der Hersteller einer zuverlässigen und vertrauenswürdigen Messung. Diese Genauigkeit gilt nur bei klar definierten Referenzbedingungen, siehe Datenblatt [61]. Die Änderung der Genauigkeit bei abweichenden Temperaturen und Drücken von den jeweiligen Kalibrierungsgrößen ist in Tabelle 44 angegeben. Durch eine entsprechende Kalibrierung und Nullpunkteinstellung des Messsystems können die Abweichungen der Genauigkeitswerte auch in der Praxis weitgehend korrigiert werden. Aufgrund der zu erwartenden sehr geringen Schwankungen dieser Größen werden diese Genauigkeitsänderungen geringen Einfluss auf die Gesamtgenauigkeit haben. Anders als bei der Flüssigkeitsdurchflussmessung gibt es bei der Gasdurchflussmessung keine eindeutigen Angaben zum Nenn- und Maximaldurchfluss des Messgerätes. Diese ebenfalls in Tabelle 44 angegebenen Größen berechnen sich durch Gleichung (16) [61]. Für die Berechnung notwendig ist die Machzahl M (0,2 für Nenndurchfluss, 0,3 für Maximaldurchfluss), sowie die physikalischen Größen der Dichte $\rho = 132,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ und der Schallgeschwindigkeit $v_{\text{Schall}} = 304,9 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ in Prozesspunkt 15 [62]. Der Innendurchmesser der beiden Messrohre des Gerätes beträgt $d_i = 5,3 \text{ mm}$ (M. Riedl - Emerson, persönliche Kommunikation, 19.01.2024).

$$\dot{m}_{\text{Gas}} = M * \rho * v_{\text{Schall}} * \frac{1}{4} * \pi * d_i^2 * 2 \quad (16)$$

Das Messgerät für **Prozesspunkte 22** entstammt, anders als die bisher gewählten Messsysteme, nicht der Micro Motion F-Serie, sondern ist Teil der Micro Motion ELITE Serie, siehe Abbildung 28. Diese Serie wird vom Hersteller als die “Best-in-Class“-Serie für die Durchflussmessung bezeichnet und ist speziell für schwierigste Anwendungen bzw. Rahmenbedingungen gedacht. Speziell im Hinblick auf die möglichen sehr geringen Durchflussraten sticht diese Geräteserie hervor. Gleichzeitig bietet die ELITE-Serie die selben Vorteile wie die F-Serie, bspw. hohe Robustheit, Langzeit-Zuverlässigkeit und die Abwesenheit bewegter Teile. Aufgrund der Spezialisierung dieses Messgerätes auf schwierige Messbedingungen ist die umfassende Prüfung und Kalibrierung des Messsystems bei Montage besonders wichtig. Der Nachteil der sehr hohen Anschaffungskosten des Messsystems wiegt bei dieser Systemserie noch schwerer als bei Geräten der F-Serie.

Abbildung 28: *Micro Motion Messsysteme der ELITE-Serie [63]*

Die in der Tabelle 45 aufgelisteten Messgenauigkeiten werden durch die angesprochene Kalibrierung des Systems gewährleistet und gelten für die Vermessung von Flüssigkeiten mittels der angeführten Typen. Zusätzlich zum Durchfluss kann mit diesem Messsystem auch die Dichte und Prozesstemperatur bestimmt werden, was jedoch in diesem Prozesspunkt nicht zwingend notwendig wäre. Die interne Temperaturmessung im Messrohr wird vom System dafür verwendet, Temperatureinflüsse auf die Messung zu kompensieren [63].

Tabelle 45: *Spezifische Arbeitsbereiche und Messabweichungen des Messgerätes Micro Motion ELITE Type CMFS015M bei der Messung von Flüssigkeiten [63]*

Temperaturbereich	-100 bis 204 °C
max. Sensorbetriebsdruck	153,41 bar
max. Viskosität	0,0005 $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
Umgebungstemperatur	-40 bis 60 °C
Genauigkeit Massedurchfluss ⁸	+/- 0,10 %
Reproduzierbarkeit Massedurchfluss	0,05 %
Genauigkeit Dichtemessung	+/- 0,5 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Reproduzierbarkeit Dichtemessung	0,2 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Nenndurchfluss	0,086 $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
max. Durchfluss	0,092 $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
Einfluss der Prozesstemperatur ⁹	+/- 0,0002 %
Einfluss des Prozessdruckes ¹⁰	keine Angabe

Der in Tabelle 45 angeführte Temperaturbereich ist ausreichend für die in Prozesspunkt 22 vorherrschenden Bedingungen, siehe Tabelle 9. Der angeführte maximale Sensorbetriebsdruck von 153,41 bar liegt deutlich über dem maximal auftretenden Druck von 32,2 bar. Auch die Bedingungen an die Umgebungstemperatur sollte bei den existierenden Prozesstemperaturen ohne Probleme und weitere Maßnahmen eingehalten werden können. Die Viskosität des Messstoffes im Prozesspunkt 22 liegt im Größenbereich von $10^{-7} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ und unterschreitet daher bei weitem die maximale Viskosität, die das Messsystem

⁸Reproduzierbarkeit, Linearität, Hysterese, Ausrichtung und Nichtlinearitäten inkludiert

⁹Einheit: % des max. Massedurchfluss pro °C

¹⁰Einheit: % des Messwertes pro bar

vorgibt. Die angeführte Genauigkeit der Massedurchflussmessung ist mit 0,1 % und einer Reproduzierbarkeit von 0,05 % deutlich besser als die Genauigkeiten der Messsysteme der Micro Motion F-Serie. Die in Kapitel 5.2.2 geforderte Messgenauigkeit von 2 % wird bei Weitem unterschritten. Das Messgerät scheint hier in Sachen Messgenauigkeit leicht überdimensioniert, wurde allerdings dennoch vom Hersteller empfohlen, um eine zuverlässige Messung zu gewährleisten. Abweichungen in der Genauigkeit bei anderen Temperaturen und Drücken als den jeweiligen Referenzbedingungen sind in Tabelle 45 dargestellt und können durch entsprechende Nullpunkteinstellungen und Kalibrierungen des Messsystems auch in der Praxis weitgehend korrigiert werden. Aufgrund der zu erwartenden sehr geringen Schwankungen dieser Größen werden diese Genauigkeitsänderungen geringen Einfluss auf die Gesamtgenauigkeit haben. Der angegebene Nenndurchfluss definiert den Punkt, an dem das Messsystem bei Referenzbedingungen einen Druckabfall von ca. 1 bar verursacht.

Im Hinblick auf die sehr hohen Anschaffungskosten dieses wortwörtlich elitären Messsystems und die deutliche Überschreitung der geforderten Messgenauigkeiten ist der Einsatz einer Durchflussmessung an diesem Prozesspunkt nochmals zu überdenken. Eventuell könnten hier auch andere experimentellere Durchflussmessverfahren zum Einsatz kommen. Das Problem scheint dabei jedoch zu sein, dass die Hersteller die gewünschten Anforderungen nicht ohne weiteres garantieren. Dies führt zu einem deutlich erhöhten Kommunikations- und Forschungsaufwandes gemeinsam mit den Herstellern.

Prozesspunkte 5 und 7

Die Temperaturen und Drücke der Prozesspunkte 5 und 7 sind nach Tabelle 11 nahezu ident. Auch der Phasenzustand ist in beiden Punkten derselbe. Die Messanforderung unterscheidet sich einzig in der zu messenden Durchflussmenge, siehe Tabelle 12. Es wurde ein Durchflussmessgerät ausgewählt, welches die Anforderungen an die Durchflussmengen beider Prozesspunkte erfüllt.

Der Durchfluss in Prozesspunkt 5 und 7 wird jeweils mit dem **Micro Motion ELITE Coriolis Messsystem CMFS100P** von **Emerson Process Management AG** gemessen.

Das Messsystem entstammt der selben Bauserie wie das Messsystem in Prozesspunkt 15, der Micro Motion ELITE-Serie, und besitzt auch die gleichen Vorzüge. Die Messung an diesen beiden Punkten stellt die größte Herausforderung bei der Auswahl des Messsystems dar. Nur einer von 14 angefragten Herstellern legte ad hoc ein Angebot mit einem zuverlässigen Messsystem. Die genannten primären Probleme der Prozesspunkte waren der transkritische Phasenzustand, die hohe Temperatur, die hohe Durchflussmenge sowie die angegebenen Fließgeschwindigkeiten. Die Coriolis-Messung von Emerson Process Management scheint mit diesen Parametern jedoch umgehen zu können. Auch vergleichende Arbeiten in der Literatur griffen bereits auf die Coriolis-Messgeräte der Micro Motion ELITE-Serie zurück. So verwendeten bspw. auch M. Graeber [50] und R. B. Barta, et.al [60] Messsysteme dieser Serie. Es wurden zwei experimentelle Alternativen zum Coriolis-Messverfahren bei transkritischen Phasenzuständen wahrgenommen. Zum einen die Durchflussmessung mittels des Venturi-Prinzips, welches nach Erkenntnissen aus dem Jahr 2023 von J. H. Park und J. E. Cha [64] für die Vermessung von transkritischem CO₂ verwendet werden kann. Zum anderen sah die Firma Flexim realistische Chancen, eine Ultraschall-Durchflussmessung mit genannten Applikationsbedingungen nach der

5 Erstellung des Messkonzepts

Durchführung von Testmessungen verwirklichen zu können (P. Brunner - Flexim, persönliche Kommunikation, 02.08.2023). Beide Möglichkeiten wurden trotz zuversichtlicher Chancen aufgrund des experimentellen Charakters nicht näher in Erwägung gezogen, da die Prototypenphase der Erforschung des Prozesses dient und sich nicht mit der Messtechnik beschäftigen soll. Zukünftig könnten diese Messverfahren jedoch eine Alternative darstellen.

Für das Messsystem gelten die Parameter aus Tabelle 46, da laut Berechnung und Angebot des Herstellers die Messung der transkritischen Phase der Messung eines Gases entspricht, zumindest was die Parameter, Genauigkeiten und Grenzwerte betrifft. Mit diesem Messsystem ist die in Kapitel 5.2.2 erwähnte wünschenswerte Bestimmung der Dichte zusätzlich zum Durchfluss möglich. Weiters beinhaltet das Messsystem eine Temperaturmessung, auf welche jedoch aufgrund der zusätzlich verwendeten Sensorik in der Prozessregelung nicht zurückgegriffen wird. Die Temperatur wird intern im Messgerät jedoch dafür verwendet, Temperatureinflüsse auf die Messung zu kompensieren [63].

Tabelle 46: *Spezifische Arbeitsbereiche und Messabweichungen des Messgerätes Micro Motion ELITE Type CMFS100P bei der Messung von Gasen [63]*

Temperaturbereich	-100 bis 204 °C
max. Sensorbetriebsdruck	250 bar
max. Viskosität	0,0005 $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
Umgebungstemperatur	-40 bis 60 °C
Genauigkeit Massedurchfluss ¹¹	+/- 0,25 %
Reproduzierbarkeit Massedurchfluss	0,20 %
Nenndurchfluss	4,56 $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
max. Durchfluss	6,83 $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
Einfluss der Prozesstemperatur ¹²	+/- 0,0001 %
Einfluss des Prozessdruckes ¹³	-0,005 %

Der in der Tabelle 46 angeführt Druckbereich ist für die in den Prozesspunkten 5 und 7 auftretenden Bedingungen ausreichend. Die in Tabelle 10 angeführt maximale Viskositätsgrenze von 0,0005 $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ wird mit einer Viskosität in der Größenordnung von $10^{-7} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ [62] unterschritten. Der Prozesstemperaturbereich wird ebenfalls nicht überschritten, allerdings ist auf die Einhaltung der definierten maximalen Umgebungstemperatur von 60 °C bei der Montage des Messsystems und der notwendigen Elektronik zu achten. Eine Überschreitung der Temperaturen, ist aufgrund von Prozesstemperaturen von bis zu 150 °C, siehe Tabelle 11, nicht auszuschließen. Laut Datenblatt des Herstellers und tatsächlicher Notwendigkeit bei der Umsetzung des Prototyps können diese Temperaturgrenzen durch eine abgesetzt montierte Auswertelektronik geringfügig ausgeweitet werden [63]. Die Messgenauigkeit der Massedurchflussmessung ist mit 0,25 % sehr hoch, war aber wie beschrieben bei der Auswahl des Messsystems nicht der entscheidende Faktor. Laut Datenblatt [65] kann die Genauigkeit durch eine Gaskalibrierlinearisierung weiter erhöht werden. Die ebenfalls in Tabelle 46 angeführten Nenn- und Maximaldurchflüsse errechnen

¹¹Reproduzierbarkeit, Linearität, Hysterese, Ausrichtung und Nichtlinearitäten inkludiert

¹²Einheit: % des max. Massedurchfluss pro °C

¹³Einheit: % des Messwertes pro bar

sich durch Gleichung (16) [63]. Die getroffenen Annahmen zur Berechnung waren eine Machzahl M von 0,2 für den Nenndurchfluss und 0,3 für den Maximaldurchfluss, sowie eine Dichte ρ von $222,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ und eine Schallgeschwindigkeit v_{Schall} von $259,9 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, welche sich bei Normbedingungen nach Tabelle 11 ergeben [62]. Der Innendurchmesser der beiden Messrohre des Gerätes beträgt $d_i = 15 \text{ mm}$ [65].

Der technische Vorschlag für die Vermessung dieser Prozesspunkte sieht dieses System vor, weist jedoch abermals auf deren aufwendige Messung hin. Aufgrund der sehr komplexen Messaufgabe in diesen Punkten und der damit verbundenen Auswahl eines wahrlichen high-tec Messsystems mit entsprechend hohen Anschaffungskosten, sollte die tatsächliche Verwendung des Systems beim Bau des Prototyps abermals evaluiert werden.

Prozesspunkt 24

Der Durchfluss in Prozesspunkt 24 wird mittels dem **Micro Motion F-Serie Coriolis Messsystem F050S** von **Emerson Process Management AG** gemessen.

Wie in Prozesspunkt 15 wird hier ein Messsystem der Micro Motion F-Serie für die Durchflussmessung an einem gasförmigen Arbeitsmedium vorgeschlagen. Jedoch unterscheiden sich die genauen Typen der Messsysteme im Prozesspunkt 15 und hier im Prozesspunkt 24. Das Messsystem basiert abermals auf dem in Kapitel 3.2.3 beschriebenen Prinzip der Coriolis-Durchflussmessung. Ein Großteil der angefragten Hersteller empfahl für diesen Messpunkt dieses Messverfahren. Da in sämtlichen vorhergehenden Prozesspunkten Messsysteme der Firma Emerson vorgeschlagen wurden, wird auch hier aufgrund der einfacheren Beschaffung, des Betriebes und des einheitlichen Supports ein Messsystem des selben Unternehmens vorgeschlagen. Als nicht vom Hersteller bestätigtes, aber prinzipiell mögliches alternatives Messverfahren könnte an diesem Punkt die Durchflussmessung nach dem Wirbelzählerprinzip oder nach der thermischen Massendurchflussmessung mittels Messsystem der Firma Endress+Hauser angedacht werden. Diese sind jedoch mit einer deutlich höheren Messgenauigkeit ausgestattet. Ihr Einsatz müsste vor der Verwendung mit dem Hersteller abgeklärt werden.

Die prinzipiellen Vor- und Nachteile der Coriolis-Messung und speziell des Messsystems der Micro Motion F-Serie gleichen den bei Prozesspunkt 1 und 18 beschriebenen Argumenten. Das Messsystem beinhaltet eine zusätzliche Temperaturmessung, auf welche jedoch aufgrund der weiteren verwendeten Sensorik nicht zurückgegriffen wird. Die spezifischen Parameter des Messsystems sind in Tabelle 47 angeführt.

Tabelle 47: Spezifische Arbeitsbereiche und Messabweichungen des Messgerätes Micro Motion Type F050S bei der Messung von Gasen [61]

Temperaturbereich	-100 bis 204 °C
max. Sensorbetriebsdruck	100 bar
max. Viskosität	0,0005 $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
Umgebungstemperatur	-40 bis 60 °C
Genauigkeit Massedurchfluss ¹⁴	+/- 0,35 %
Reproduzierbarkeit Massedurchfluss	0,25 %
Nenndurchfluss	0,47 $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
max. Durchfluss	0,71 $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
Einfluss der Prozesstemperatur ¹⁵	+/- 0,0002 %
Einfluss des Prozessdruckes ¹⁶	-0,0116 %

Die in Prozesspunkt 24 auftretenden Temperaturen und Drücke liegen innerhalb der vom Messsystem vorgegebenen Grenzen, siehe Tabelle 13. Auch die Bedingungen an die Umgebungstemperatur sollte bei den existierenden Prozesstemperaturen ohne Probleme und weitere Maßnahmen eingehalten werden können. Die angeführte Viskositätsgrenze wird im Prozesspunkt 24, bei dem die Viskosität in einer Größenordnung von $10^{-7} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ [62] liegt, bei weitem nicht überschritten. Das Messsystem erfüllt die gesetzte Anforderung einer maximalen Abweichung des Messwertes von 2% mit einer Messgenauigkeit von 0,5 % bei Referenzbedingungen bei weitem. Die Erreichung der Genauigkeit war bei der Auswahl des Durchflussmesssystems nicht der entscheidende Faktor, sondern die Zusage einer zuverlässigen und vertrauenswürdigen Messung durch den Hersteller. Die Änderung der Genauigkeit bei von den Referenzbedingungen abweichenden Temperaturen und Drücken ist in Tabelle 47 angegeben. Durch eine entsprechende Kalibrierung und Nullpunkteinstellung des Messsystems können die Abweichungen der Genauigkeitswerte auch in der Praxis weitgehend kompensiert werden. Aufgrund der zu erwartenden sehr geringen Schwankungen dieser Größen werden diese Genauigkeitsänderungen geringen Einfluss auf die Gesamtgenauigkeit haben. Der Nenn- und Maximaldurchfluss des Messsystems berechnete sich durch Gleichung (16) mit einer Machzahl M von 0,2 für den Nenndurchfluss und 0,3 für den Maximaldurchfluss, einer Dichte $\rho = 80,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ und der Schallgeschwindigkeit $v_{Schall} = 242,3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ [62]. Der Innendurchmesser der beiden Messrohre des Gerätes beträgt $d_i = 8,8 \text{ mm}$ (M. Riedl - Emerson, persönliche Kommunikation, 19.01.2024).

5.3.2 Sensorik der Temperaturmessung

Für die in Kapitel 5.2.3 definierten Temperaturmessstellen mit den jeweiligen Temperaturbereichen und Anforderungen wird hier nun ein konkreter Vorschlag für die Sensorik unterbreitet. Wie in Kapitel 3.2.1 eingeführt, kommen grundsätzlich zwei verschiedene Messverfahren zur Temperaturmessung für diesen Prozess in Frage: Thermoelemente und Widerstandsthermometer. Die jeweiligen Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren

¹⁴Angabe für Basisversion des Messgerätes - Reproduzierbarkeit, Linearität und Hysterese inkludiert

¹⁵Einheit: % des max. Massendurchfluss pro °C

¹⁶Einheit: % des Messwertes pro bar

wurden im genannten Kapitel bereits eingehend angeführt. Den Vorteilen der Thermoelemente - im Speziellen der große Messbereich sowie die schnelle Ansprechzeit - stehen die Vorteile der Widerstandsthermometer gegenüber - im Speziellen die hohe Messgenauigkeit sowie Langzeitstabilität.

Der zu messende Temperaturbereich der einzelnen Prozesspunkte bewegt sich nach Tabelle 15 zwischen $-3,5\text{ °C}$ und 150 °C und ist in den Maßstäben der Industrie- und Prozesstechnik verhältnismäßig klein. Der Betrieb des Prozesses ist laut Kapitel 4 auf möglichst statische Betriebszustände im Hinblick auf sich verändernde Temperaturen ausgelegt. Große, rasch vonstatten gehende Veränderungen in der Temperatur sind nur bei Änderung des Betriebsmodus zu erwarten. Die Anforderungen an die Ansprechzeit halten sich daher in Grenzen. Diese beiden Punkte entkräften die primären Vorteile der Thermoelemente im Vergleich zu jenen der Widerstandsthermometer. Die hohe Genauigkeit und gute Langzeitstabilität wiegen hier schwerer. V. Illyes et.al [57] bringt es auf den Punkt: „Collecting data of a certain quality is the heart of experimental research. ... Saving an insignificant amount of money on a low-quality temperature sensor may not be worth it in the long run.“ Unabhängig voneinander haben die Projektpartner Wien Energie und Edtmayer Systemtechnik die Verwendung von Widerstandsthermometern empfohlen und vorgeschlagen. Auch die Auseinandersetzung mit technischen Informationen von Herstellern vermittelt den Eindruck, dass Widerstandsthermometer den Stand der Technik in diesem Anwendungsgebiet der Wärme-/Kälte-Prozesstechnik darstellen. Aufgrund dieser Punkte werden für alle drei Anforderungsklassen Widerstandsthermometer vorgeschlagen. Wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben, gibt es unterschiedliche Arten von Widerstandsthermometern. Hier werden ausschließlich Metallwiderstandssensoren und keine Halbleiterwiderstandssensoren ausgewählt. Deren höhere Messgenauigkeit und Linearität sowie Temperaturzyklus-Fähigkeit geben hier den Ausschlag. Als verwendetes Metall wird auf das laut Stand der Technik übliche Platin zurückgegriffen. Wie bereits in Kapitel 3.2.1 angeführt, hat sich dieses Material aufgrund seines großen Temperaturkoeffizienten mit gleichzeitig hoher thermischer und mechanischer Stabilität durchgesetzt.

Um die im Nachgang ausgewählten Temperatursensoren vor den teilweise hohen Drücken von bis zu 140 bar (siehe Tabelle 15) zu schützen, werden die Sensoren durch Einschraub- bzw. Einschweißschutzhülsen von den Prozessdrücken entkoppelt. Dabei ist auf eine möglichst hohe thermische Kopplung zu achten. Die Ansprechzeit der Sensoren wird durch dieses zusätzliche Schutzrohr erhöht. Die genauen Schutzhülisentypen sind jeweils von den Rohrdimensionen in den Prozesspunkten abhängig und entsprechend auszuwählen. Beispielfhaft wird die Einschraub- und Einschweiß-Schutzhülse von der Firma JUMO genannt [66].

Für alle drei in Kapitel 3.2.1 definierten Anforderungsklassen - Standard, Hoch, Sehr Hoch - wird zusätzlich zur zuvor erwähnten Schutzhülse das **Einschraubwiderstandsthermometer mit Anschlusskopf Form B** von der Firma **JUMO** ausgewählt. Auf die entsprechenden Rohrdimensionen, Einbaulängen und Einbaulagen ist bei der tatsächlichen Umsetzung abermals achtzugeben. Dies wird in dieser Arbeit nicht weiter thematisiert.



Abbildung 29: *Einschraubwiderstandsthermometer von JUMO [67]*

Das Thermometer ist bereits in seiner einfachsten Ausführung für Temperaturen zwischen $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $+260\text{ }^{\circ}\text{C}$ geeignet und sowohl für flüssige als auch gasförmige Medien einsetzbar. Der Anschlusskopf ist für Temperaturen bis $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ geeignet und muss entsprechend thermisch vor den teilweise höheren Prozesstemperaturen geschützt werden. Die Ansprechzeit, definiert über die Zeit $t_{0,9}$ bis sich das Thermometer zu 90 % an die zu messende Temperatur angeglichen hat, beträgt ca. 50 Sekunden. Diese Zeit gilt für das Messmedium Wasser bei einer Fließgeschwindigkeit von $0,2\frac{\text{m}}{\text{s}}$ und einem Rohrdurchmesser von 9 mm [67]. Die drei definierten Anforderungsklassen unterscheiden sich zum einen durch den im Thermometer verwendeten Messeinsatz, der beim Thermometer beliebig austauschbar und an die gewünschte Messanforderung anpassbar ist, zum anderen durch die Ausführung und Anzahl der Messzuleitungen.

Sensorik für standardmäßige Anforderungen

Für die in Kapitel 5.2.3 mit dem Anforderungsgrad Standard versehenen Prozesspunkte wird als Messeinsatz für den Einschraubwiderstandsthermometer ein **PT100 Schichtwiderstand** der **Genauigkeitsklasse B** mit einer **Zweileiter-Messschaltung** ausgewählt. Nach Tabelle 2, welche die Genauigkeitsklassen nach ÖNORM EN 60751 beschreibt [40], beträgt die Grenzabweichung des Sensors im Temperaturbereich zwischen $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $+500\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\pm (0,3 + 0,005 |t|)$, wobei $|t|$ den Absolutbetrag der Temperatur in $^{\circ}\text{C}$ darstellt. Diese Messabweichung ist aufgrund des zweiten Terms der Angabe abhängig vom Prozesspunkt, jedoch maximal $\pm 1,05\text{ }^{\circ}\text{C}$, welche sich bei der Maximaltemperatur des Prozesses von $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ergibt. Dies stellt lediglich die Messabweichung des Sensors dar und nicht die Messabweichung der gesamten Messung. Wie im Kapitel 3.2.1 beschrieben beeinflussen unter anderem auch die Widerstände der Messzuleitungen das Gesamtergebnis. Als ein Richtwert des Herstellers WIKA ist für eine Kupferleitung mit Querschnitt $0,22\text{ mm}^2$ eine zusätzliche Messabweichung von bis zu $0,42\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{m}}$ bei einem PT100 Sensor zu erwarten [68]. Abhängig von der Messleitungslänge ist das eine nicht zu vernachlässigende Messabweichung. Bei zu langen Leitungslängen ist eine Abänderung der Messschaltung auf eine Drei-, bzw. Vierleiterschaltung zur Vermeidung der zusätzlichen Messabweichung, oder eine Erhöhung des Messleitungsquerschnittes zur Verringerung der Messabweichung zu empfehlen. Alternativ kann auch eine Ausführung mit einem Pt1000 statt Pt100 Sensors gewählt werden, da bei diesem der Einfluss der Zuleitungswiderstände um den Faktor 10 geringer ausfallen. Der Richtwert wird bei Pt1000 mit $0,04\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{m}}$ angegeben [68].

Sensorik für hohe Anforderungen

Als Messeinsatz für Prozesspunkte mit dem Anforderungsgrad Hoch wird für den Widerstandsthermometer ein **PT100 Schichtwiderstand** der **Genauigkeitsklasse A** mit einer **Vierleiter-Messschaltung** ausgewählt. Die Grenzabweichung des Sensors nach Tabelle 2, welche die Genauigkeitsklassen nach ÖNORM EN 60751 beschreibt [40], ist $\pm (0,15 + 0,002 |t|)$ in einem Temperaturbereich zwischen -30 °C und $+300\text{ °C}$, wobei $|t|$ den Absolutbetrag der Temperatur in °C darstellt. Das entspricht bei der maximal möglichen Prozesstemperatur von 150 °C einer Messabweichung durch den Messeinsatz von $\pm 0,45\text{ °C}$. Zusätzlich zur Verbesserung der Genauigkeitsklasse bringt der Wechsel von einer Zweileiter-Messschaltung auf eine Vierleiter-Messschaltung einen wesentlichen Anstieg der Gesamtgenauigkeit mit sich. Durch die Verwendung einer Vierleiterschaltung kann, wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben, der zusätzlich auftretende Leitungswiderstand kompensiert und so die Messabweichung durch die Messleitungen vermieden werden. Hohe Messanforderungen wurden an die Vermessung von Prozesspunkten gestellt, welche einen wesentlichen Anteil an der zukünftigen Regelung des Prozesses haben könnten. V. Illyes et.al [57], welche 2023 Ergebnisse zu einer CO_2 -Testanlage an der TU Wien veröffentlichte, sprach die klare Empfehlung aus, Temperatursensoren mit einer höheren Genauigkeitsklasse als B für solche Testanlagen zu verwenden. Dieser Empfehlung wird hier nachgegangen. Da erst Messstellen mit beschriebenen hohen Anforderungen tatsächlich Einfluss auf den Prozess nehmen bzw. kritische Informationen bereitstellen, werden jedoch erst hier Sensoren von Klasse A verwendet und nicht bei Messstellen mit dem standardmäßigen Anforderungsgrad.

Sensorik für sehr hohe Anforderungen

Für Messstellen mit einem sehr hohen Anforderungsgrad an die Temperaturmessung wird ein **PT1000 drahtgewickelter Widerstand** der **Genauigkeitsklasse AA** mit einer **Vierleiter-Messschaltung** ausgewählt. Durch die Wahl der nach ÖNORM EN 60751 [40] höchsten Genauigkeitsklasse wird eine Grenzabweichung von nur $\pm (0,1 + 0,0017 |t|)$ erreicht, wobei $|t|$ für den Absolutbetrag der Temperatur in °C steht. Die maximale durch den Messeinsatz verursachte Messabweichung liegt bei der Prozesstemperatur von 150 °C bei $\pm 0,36\text{ °C}$. Der Gültigkeitsbereich dieser Grenzabweichung wird durch die Wahl eines drahtgewickelten Widerstandes, anstelle eines Schichtwiderstandes, auf den notwendigen Temperaturbereich erhöht und beträgt -50 °C bis $+250\text{ °C}$. Ident zu den Messstellen mit hohem Anforderungsgrad wird eine Vierleiter-Messschaltung verwendet, um die auftretenden Messabweichungen durch die Leitungswiderstände vollständig zu kompensieren. Die Wahl eines Pt1000 statt eines Pt100 für den höchsten Anforderungsgrad wird durch den Projektpartner Edtmayer Systemtechnik mit einer höheren Wiederholgenauigkeit argumentiert.

5.3.3 Sensorik der Druckmessung

Die zu messenden Drücke nach Tabelle 15 sind zwischen $31,7\text{ bar}$ und 140 bar . Die Messung der Drücke in diesem Bereich sollte im Vergleich zur Durchflussmessung eine sehr einfache Messaufgabe darstellen. Gespräche mit den Projektpartnern und eine Marktrecherche über verfügbare Produkte haben dies bestätigt und eine breite Palette an möglichen Messgeräten hervorgebracht. Die Wahl des dem Sensor zugrundeliegenden

5 Erstellung des Messkonzepts

Messverfahrens, siehe Kapitel 3.2.2, hat in diesem zu messenden Druckbereich keinen allzu großen Einfluss auf die Erreichung der beschriebenen Messaufgabe. Im Hintergrund dieser Situation entstand der Messgerätevorschlag für Prozesspunkte mit standardmäßigen und hohen Messanforderungen in erster Linie durch den Austausch mit den Projektpartnern. Das Messgerät für die sehr hohe Anforderungsklasse wurde in erster Linie aufgrund dessen extrem hoher Genauigkeit ausgewählt.

In Analogie zur notwendigen Entkopplung der Temperaturmessgeräte vom Prozessdruck mittels Schutzrohr, müssen die Druckmessgeräte vor zu hohen Temperaturen geschützt und thermisch vom Prozess entkoppelt werden. Dies ist notwendig, da Druckmessgeräte häufig nur in einem sehr geringen Temperaturbereich verwendet werden können. Die thermische Entkopplung geschieht durch die Verwendung von sogenannten Wassersackrohren. Dies sind kreis- oder u-förmige Rohrstücke, welche mit speziellen Medien, bspw. Wasser, gefüllt sind und das Messgerät vor dem direkten Kontakt mit dem eigentlichen Messmedium bewahrt. Neben der thermischen Entkopplung schützen diese Rohre auch vor Druckstößen im Prozess. Die Empfehlung ist es, für jede Druckmessung, unabhängig von deren in Kapitel 5.2.3 definierten Anforderungsklasse - Standard, Hoch, Sehr Hoch -, solch ein Wassersackrohr zu verwenden. Die Auswahl des genauen Wassersackrohres ist jeweils von den Rohrdimensionen der Messstellen abhängig und ist entsprechend auszuwählen. Beispielfhaft wird das Wassersackrohr E30141 SIPHON TUBE G1/2 von der Firma ifm electronics gmbh genannt [69].

Sensorik für standardmäßige Anforderungen

Für die in Kapitel 5.2.3 mit dem standardmäßigen Anforderungsgrad versehenen Prozesspunkte wird der **Drucktransmitter PT5501 PT-250-SEG14-A-ZVG/US** der Firma **ifm electronics gmbh** vorgeschlagen [70].



Abbildung 30: *Drucktransmitter PT5501 von ifm [70]*

Dieser Drucktransmitter ist laut Hersteller speziell für die zuverlässige Erfassung des Systemdruckes in mobilen Arbeitsmaschinen aufgrund dessen hoher Schock- und Vibrationsfestigkeit und der robusten Edelstahlausführung geeignet [70]. Da es sich bei der Umsetzung des Prozesses um einen Prototyp handelt und der Aufstellungsort noch unbekannt, sowie mögliche Veränderungen dessen nicht auszuschließen sind, sind diese genannten Punkte von Vorteil. Der Drucktransmitter verwendet als Messprinzip eine Messzelle mit Dehnungs-Messstreifen (I. Ilic - ifm, persönliche Kommunikation, 09.02.2024). Der Sensor misst einen Überdruck p_e und kann im Bereich zwischen 0 und 250 bar eingesetzt werden. Damit ist er für die in Tabelle 15 beschriebenen Drücke perfekt geeignet.

Er ist sowohl für flüssige, als auch für gasförmige Medien verwendbar [70]. Der vom Drucktransmitter vorgegebene Mediumtemperaturbereich ist -40 °C bis 125 °C [70]. Die obere Grenze dieses Bereiches liegt unter der maximalen Prozessstemperatur von 150 °C und würde ohne die Verwendung des zuvor beschriebenen Wassersackrohres ein Problem darstellen. Das angeführte Wassersackrohr mindert eine vor dem Rohr anstehende Temperatur von 150 °C auf eine Mediumtemperatur hinter dem Wassersackrohr von nur 50 °C [69]. Diese Angaben gelten für das Medium Wasser bei einer Umgebungstemperatur von 25 °C . Diese geminderte Temperatur liegt im vom Drucktransmitter geforderten Temperaturbereich. Die Überschreitung der maximal zulässigen Umgebungstemperatur des Drucksensors von 100 °C muss durch entsprechende Maßnahmen, beispielsweise der Platzierung des Sensors außerhalb der Prozessisolierung, verhindert werden. Die Genauigkeit des Messgerätes wird über die Kennlinienabweichung mit $< +/- 0,8\%$ der Messspanne angegeben. Diese Abweichung inkludiert bereits Messabweichungen durch den Einschraubdrift, Nullpunkt- und Spannenfehler, Nichtlinearitäten und die Hysterese. Um die Gesamtgenauigkeit zu erhalten, kommen unbekannte Messabweichungen wie bspw. der Signalübertragung, zu dieser Kennlinienabweichung noch dazu. Mit einer Wiederholgenauigkeit von $< +/- 0,05\%$ der Messspanne und der erwähnten Messabweichung von $< +/- 0,8\%$ ist dieser Drucktransmitter nach Abstimmung mit den Projektpartnern bestens für diese Messanforderungskategorie geeignet.

Sensorik für hohe Anforderungen

Für die Prozesspunkte mit der hohen Anforderungskategorie wird ebenfalls der **Drucktransmitter PT5501 PT-250-SEG14-A-ZVG/US** von der Firma **ifm electronics gmbh** vorgeschlagen [70]. Dieser Drucktransmitter ist wie beschrieben bestens für die beschriebenen Druckmessungen geeignet und soll daher zusätzlich zu den drei Messstellen mit standardmäßigem Anforderungsgrad auch für den hohen Anforderungsgrad eingesetzt werden. Eine Maßnahme, mit der die Messgenauigkeit dieses Messsystems in dieser hohen Anforderungskategorie langfristig verbessert werden kann, ist die jährliche Neukalibrierung der Sensoren. Das Messsystem hat eine im Datenblatt angegebene Langzeitstabilität von $< +/- 0,1\%$ (pro 6 Monate) [70]. Nach einem Jahr vergrößert sich die zu erwartende Messabweichung also um bis zu $+/- 0,2\%$. Dieser über die Zeit entstehenden Abweichung sollte mit der jährlichen Neukalibrierung des Messgerätes entgegengewirkt werden.

Sensorik für sehr hohe Anforderungen

Die Druckmessungen bei Prozesspunkten mit sehr hohen Anforderungen werden mit dem **Präzisions-Drucksensor mit innenliegender Membran aus Edelstahl SD-36/37** der Firma **SUCHY Messtechnik** ausgestattet [71].



Abbildung 31: Präzisions-Drucksensor von SUCHY [71]

Dieser Präzisions-Drucksensor ist ausdrücklich für die Vermessung sowohl gasförmiger als auch flüssiger Druckmedien geeignet und empfiehlt sich durch seine große Beschleunigungs- und Vibrationsfestigkeit und im Speziellen durch seine hohe Genauigkeit. Diese ist mit einer Messabweichung von $\pm 0,1\%$ des Endwertes deutlich geringer als jene des Drucksensors für die standardmäßige und hohe Messanforderung. Die Reproduziergenauigkeit liegt bei $< \pm 0,05\%$. Um die hohe Genauigkeit auch über längere Zeiträume gewährleisten zu können, ist die Neukalibrierung des Drucksensors in jährlichen Abständen empfohlen. Die Langzeitstabilität des Sensors ist mit $< \pm 0,1\%$ des Endwertes bei Referenzbedingungen angegeben. Diese Stabilität ist doppelt so hoch wie beim Drucktransmitter von JUMO. Der Temperaturbereich, in dem der Sensor eingesetzt werden kann, beträgt -20 °C bis 80 °C . Die richtige thermische Entkopplung des Sensors vom Messmedium mittels Wassersackrohr ist hier abermals von großer Bedeutung. Auf die Einhaltung der Umgebungstemperaturgrenze von ebenfalls 80 °C ist zu achten. Das im Drucksensor angewandte Messverfahren ist die in Kapitel 3.2.2 erwähnte Dünnschichttechnik. Der Sensor ist in verschiedenen Druckausführungen verfügbar und kann in einer passenden Variante für die Überdruckmessung im Bereich zwischen 0 und 250 bar angewandt werden. Damit ist dieser Sensor für die in Tabelle 15 beschriebenen Drücke perfekt geeignet. Die Auswahl der genauen Type - SD-36 oder SD-37 - ist von der zukünftigen Anschlussgröße an den Prozess abhängig.

5.3.4 Sensorik der Füllstandsmessung

Für die Messung des Füllstandes in den beiden Sammlern MS und NS mit den in Kapitel 5.2.4 beschriebenen Anforderungen werden vier Grenzstanddetektoren ausgewählt. Zwei Detektoren pro Sammler genügen, um den minimalen und maximalen Grenzstand der Flüssigkeit im Sammler zu überwachen. Die in den Sammlern auftretenden Temperaturen und Drücke, siehe Tabelle 41, lassen es zu, die gleiche Detektor-Type für die beiden unterschiedlichen Sammler zu verwenden.

Nach eingehender Recherche und finaler Abstimmung mit dem Projektpartner Edtmayer Systemtechnik wurde als Sensor **Vibronik Grenzstanddetektion Liquiphant FTL50** von **Endress+Hauser** ausgewählt.

5 Erstellung des Messkonzepts



Abbildung 32: Vibronik Liquiphant FTL50 von Endress+Hauser [72]

Die Grenzscharter arbeiten nach der in Kapitel 3.2.4 beschriebenen Messmethode der Vibrationscharter, welche auf dem Prinzip der Dämpfung einer Schwingung durch Kontakt mit Medien beruht. Vorteile dieses ausgewählten Sensors sind die sehr kompakte Bauweise, die einfache Inbetriebnahme ohne die Notwendigkeit einer aufwendigen Kalibrierung, sowie ein wartungsfreier und langlebiger Aufbau [72]. Ein weiterer Grund für die Wahl eines Sensors dieses Messverfahrens war die Erfahrung des Projektpartners Edtmayer Systemtechnik mit diesem. Die Sensoren können als Zusatzgröße neben dem Grenzstand auch die Dichte des Messmediums bestimmen. Diese Dichtemessung an sich ist an diesem Messpunkt prinzipiell nicht vorgesehen, die Möglichkeit einer Messung bietet jedoch ein weiteres Argument für diesen Sensors.

Tabelle 48: Arbeitsbereiche und Messabweichungen des Vibronik Liquiphant FTL50 Grenzstanddetektors

Temperaturbereich	-50 bis 150 °C
Druckbereich	0 bis 64 bar
min. Mediumsdichte	0,5 $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
Umgebungstemperatur	-50 bis 70 °C [72]
max. Messabweichung ¹⁷	+/- 1 mm
Wiederholbarkeit	0,1 mm
Schaltherese	2 mm
max. Einfluss der Messstofftemperatur	+1,8 bis -2,8 mm (-50 bis 150 °C)
max. Einfluss der Messstoffdichte	+4,8 bis -3,5 mm (0,5 bis 1,5 $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$)
max. Einfluss des Messstoffdruckes	0 bis -2,5 mm (-1 bar bis 64 bar) ¹⁸
Schaltverzögerung	0,5 s bei Bedecken der Schwinggabel 1,0 s bei Freiwerde der Schwinggabel [73]

Die in den beiden Prozesspunkten auftretenden Temperaturen und Drücke, siehe Tabelle 41, liegen im Temperatur- und Druckbereich des Sensors aus Tabelle 48. Die Mediumsdichte der flüssigen Phase im MS liegt bei 0,83 $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$, im NS bei 0,95 $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ [62], und somit jeweils über der minimalen Mediumsdichte von 0,5 $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$. Eine Erwärmung des Sensors über den

¹⁷bei Referenzbedingungen 0 bar, 23 °C, 1 $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$

¹⁸Druckangabe in Überdruck

notwendigen Umgebungstemperaturbereich ist aufgrund der moderaten Temperaturen ausgeschlossen.

Die Schaltverzögerungen beim Bedecken und Freiwerden der Schwinggabel sind für die Grenzstandmessung ausreichend genau, und können auf Anfrage beim Hersteller sogar noch auf bis zu 0,2 s vermindert werden [73].

5.4 Energiebilanz

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik besagt, dass die Energie in einem geschlossenen System konstant ist. Wird nun Energie, z.B. Wärmeenergie, über die Systemgrenzen in das System zugeführt, muss sich die innere Energie des abgeschlossenen Systems dementsprechend erhöhen [45]. Ein wichtiger Schritt bei der Betrachtung eines jeden Prozesses ist es, eine Bilanz über alle dem System zu- und abgeführten Energien zu erstellen, um dadurch das System an sich besser verstehen zu können. Die Effizienz eines Prozesses, in Form eines Wirkungsgrades, ist ebenfalls abhängig von den dem System zu- und abgeführten Energiemengen. Dabei wird zwischen den nutzbaren entstehenden Energien und den aufzuwendenden Energien unterschieden.

Um in Zukunft eine grundlegende Energiebilanz des SETE-Prozesses aufstellen zu können, bzw. diese Energiebilanz im laufenden Betrieb des zukünftigen Prototyps vollständig zu erfassen, muss die entsprechende messtechnische Ausstattung dafür vorgesehen werden.

Der primäre Energieeintrag in den SETE-Prozess erfolgt über den Sekundärkreislauf Sek₁ des Wärmetauschers W_{TP} (siehe Abbildung 18). Die beiden primären Energiebezüge aus dem Prozess hinaus erfolgen über die Sekundärkreise Sek₂ des Gaskühlers (GK), und Sek₃ des Verdampfers (VD). Dies erfolgt beim GK in Form von nutzbarer Brauchwärme, beim VD in Form einer Kälteauskopplung. Weiters ist die Gewinnung elektrischer Energie über den Expander (EXP) eine nutzbare Energieform, also eine das Prozesssystem verlassende Energie. Um eine vollständige Energiebilanz aufstellen zu können, ist zu guter Letzt der Stromverbrauch, also die notwendige elektrische Energie aller Komponenten, zu messen und zu berücksichtigen. Neben den Regel- und Drosselventilen sind vor allem die Pumpen HP und P2, die Kompressoren KOM1 und KOM2, sowie das elektrische Heizelement H die relevantesten Stromverbraucher.

Abbildung 33 zeigt eine grafische Darstellung der Energiebilanz des Prozesses. Dabei stellen die strichlierten orangen Linien die Systemgrenzen dar, die roten Pfeile Wärmeströme, der blaue Pfeil einen Kältestrom und die gelben Pfeile Energieströme in Form elektrischer Energie. Die Richtung der Pfeile, also aus dem System hinaus oder hinein, definiert, ob die Energie dem Prozess zu- oder abgeführt wird.

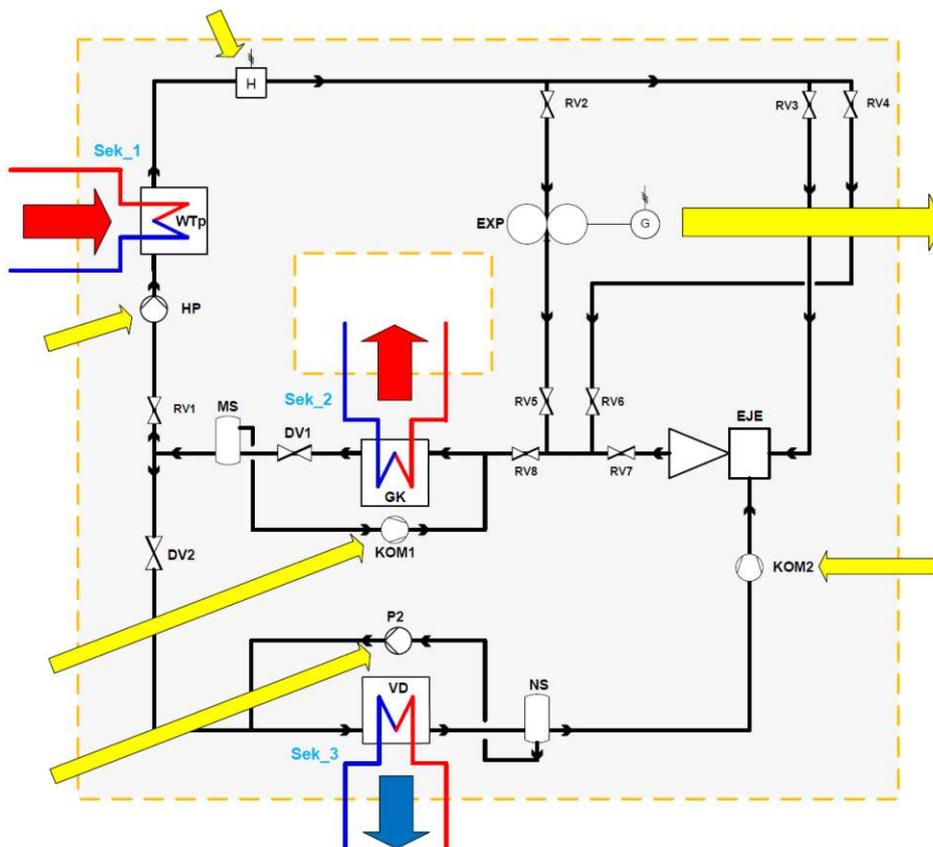


Abbildung 33: Einfache Energiebilanz des SETE-Prozesses

Für die Messung der Energiemengen wird auf den internen Wien Energie Standard zurückgegriffen. Diese Energiemengen werden zum einen über Energiemengenzähler (Wärme- und Kältemengenzähler) in den drei Sekundärkreisläufen, siehe Kapitel 5.4.1, gemessen und zum anderen über elektrische Energieanalysatoren an den einzelnen Verbrauchern und Erzeugern, siehe Kapitel 5.4.2.

5.4.1 Energiemengenzählung in den Sekundärkreisläufen

Die drei Sekundärkreisläufe Sek_{1-3} arbeiten jeweils mit dem Arbeitsmittel Wasser und repräsentieren verschiedene Energienetze der Wien Energie: das primäre Fernwärmenetz, das Fernkältenetz, sowie einen Brauchwasseranschluss. In dieser Arbeit wird nicht näher auf die notwendige Messtechnik und verbaute Sensorik in den einzelnen Sekundärkreisläufen eingegangen, da dafür in der Wien Energie bereits ein lange erprobter und optimierter Standard existiert. Nachfolgend wird allein die notwendige Sensorik für die Energiemengenzählung der Energiebilanz, wie in Kapitel 5.4 beschrieben, angeführt. Diese Sensorik entspricht dem Wien Energie Standard und wurde in Kooperation mit den zuständigen Personen ausgewählt.

5 Erstellung des Messkonzepts

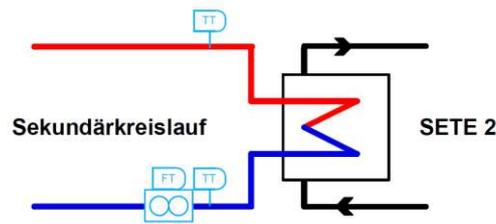


Abbildung 34: Beispielhafter Aufbau der Energiemengenzählung in einem Sekundärkreislauf

Wie im Kapitel 3.2.5 erklärt, besteht ein Wärme- und Kältemengenzähler aus einem Messgerät für den Volumenstrom bzw. Durchfluss, einem Temperaturfühlerpaar im Vorlauf und Rücklauf des Kreises, sowie einem elektronischen Rechenwerk zur Verwertung dieser Messinformationen. Abbildung 34 zeigt die Positionierung der Sensorik direkt nach dem WT im Sekundärkreislauf. Die in den Sekundärkreisläufen vorherrschenden physikalischen Größen sind in Tabelle 49 angeführt.

Tabelle 49: Relevante physikalische Größen der Sekundärkreisläufe

Sekundärkreis	1 Wärmeeintrag	2 Wärmeauskopplung	3 Kälteauskopplung
Vorlauf / °C	140,0	65,0	6,0
Rücklauf / °C	34,3	10,0	12,0
Druck / bar	16,0	4,0	4,0
Massenstrom / $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	1,3	2,8	2,9
Volumenstrom / $\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$	4,5	10,0	10,6

Die standardmäßig verwendete Messsensorik für die drei Sekundärkreise zur Energiemengenzählung ist in Tabelle 50 aufgelistet. Auf die Einhaltung der in Tabelle 49 beschriebenen Größen sowie weiterer nicht angeführter Anforderungen ist bei der finalen Auswahl der Sensorik zu achten.

Tabelle 50: Ausgewählte Messsensorik für die Energiemengenzählung in den drei Sekundärkreisen

Sekundärkreis	Sensortype - Messverfahren - Firma
1 - Wärmeeintrag	
Durchflusssensor	Sharky 775 - Ultraschall - Diehl
Temperatursensor	TS 85/120/210/480 - PT100 - Diehl
Energiezähler	Sharky 775 - Kompaktzähler - Diehl
2 - Wärmeauskopplung	
Durchflusssensor	Sharky 775 - Ultraschall - Diehl
Temperatursensor	TS 85/120/210/480 - PT100 - Diehl
Energiezähler	Sharky 775 - Kompaktzähler - Diehl
3 - Kälteauskopplung	
Durchflusssensor	WATERFLUX 3000 - Magn. Induktiv - Krohne
Temperatursensor	TS 85/120/210/480 - PT100 - Diehl
Energiezähler	SCYLAR INT M (mwz04) - Rechenwerk - Diehl

Auf die entsprechenden messtechnischen Eigenschaften der Sensorik zur Energiemengenzählung wie beispielsweise Messgenauigkeiten oder Messbereiche wird hier aufgrund der Verwendung von für Wien Energie bekannter Sensorik nicht weiter eingegangen.

5.4.2 Strommengenzählung und Stromverbraucher

Für die vollständige Aufstellung der beschriebenen Energiebilanz (siehe Kapitel 33) sind neben der Energiemengenzähler in den Sekundärkreisen auch die Messung der verbrauchten und produzierten Strommengen im Betrieb der Anlage notwendig. Die Summe aller Stromverbraucher, also die gesamte im Betrieb notwendige Strommenge, kann einfach über einen Gesamtstromzähler bestimmt werden. Aufgrund des Forschungscharakters des Prototyps sind jedoch vor allem die Stromverbräuche der einzelnen Bauteile interessant. Dadurch können Potenziale und Herausforderungen, die die Effizienz der Anlage betreffen, einfacher erkannt und analysiert werden. Grundsätzlich verbraucht eine Vielzahl von Bauteilen elektrische Energie. Darunter fallen auch kleinere Bauteile wie die motorgesteuerten Regelventile oder die Messtechnik an sich. Je mehr elektrische Energie ein Bauteil benötigt, umso relevanter ist dieses Bauteil für die Effizienz und den Betrieb des Prozesses. Deshalb fokussiert sich die in Abbildung 33 aufgestellte einfache Energiebilanz auf die Hauptkomponenten des Prozesses als Stromverbraucher und vernachlässigt Regelventile wie Messtechnik. Die Pumpen und elektrischen Verbraucher in den Sekundärkreisläufen befinden sich bereits außerhalb der gezogenen Systemgrenzen. Diese Stromverbraucher und der stromerzeugende Generator des Expanders sind nachfolgend aufgelistet.

- Stromverbraucher
 - Hauptpumpe (HP)
 - elektrisches Heizelement (H)
 - Kompressor 1 (KOM1)

5 Erstellung des Messkonzepts

- Kompressor 2 (KOM2)
- Pumpe 2 (P2)
- Stromerzeuger
 - Generator (G) des Expanders (EXP)

Analog zu den in Kapitel 5.4.1 beschriebenen Wärme- und Kältemengenzählern wird auch hier aufgrund der grundsätzlich bekannten Messaufgabe der elektrischen Energie- und Leistungsmessung nur auf den Standard der Wien Energie verwiesen und in dieser Arbeit nicht näher auf die dafür notwendige Messtechnik und verbaute Sensorik eingegangen. Da zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit die genauen Leistungsgrößen der beschriebenen Stromverbraucher und -erzeuger noch nicht final bestimmt wurden, kann hier nur plakativ ein Standard-Messgerät angeführt werden, welches bei der finalen Auswahl noch auf die vorherrschenden Anforderungen und physikalischen Größen abgestimmt werden muss.

Beispielhaft wird das für die Energievermessung der Pumpen und Kompressoren verwendete Messgerät, der **Energieanalysator für Dreiphasensysteme WM30** von **CARLO GAVAZZI**, angeführt. Mit dessen Hilfe lassen sich die System- und Phasengrößen, Betriebsstunden unter Last sowie alle relevanten elektrischen Hauptgrößen wie beispielsweise Spannung, Strom und Wirk- und Blindleistung bestimmen [74].



Abbildung 35: *Energieanalysator WM30 von CARLO GAVAZZI [74]*

6 Zusammenfassender Messkonzeptvorschlag

Bezugnehmend auf die in Kapitel 1.2 beschriebenen Aufgabenstellungen werden die Ergebnisse der Arbeit nachfolgend in Form eines Messkonzeptvorschlages zusammengefasst. Die Identifikation und Beschreibung voraussichtlicher Prozessparameter und in weiterer Folge Messgrößen für den späteren Betrieb erfolgte im Speziellen in den Kapiteln 3, 4 und 5. Die darauf folgende Auswahl, Positionierung und Beschreibung notwendiger Sensoren und Messtechnik sowie deren Eigenschaften geschah in Kapitel 5 und gipfelt in der Erstellung eines fertigen messtechnischen Gesamtkonzeptes, welches in weiterer Folge für die Errichtung eines Prototyps verwendet werden kann. Dieses Konzept ist nachfolgend angeführt. Wie unter anderem in Kapitel 5.3 erwähnt ist dieses Messkonzept ein konkreter Vorschlag, welcher auf den in dieser Arbeit beschriebenen Grundlagen, Betriebszuständen und Parametern beruht. Empfehlungen von Projektpartnern, Internetrecherchen sowie Gespräche mit Herstellern von Messsystemen haben diesen Vorschlag geformt. Das bedeutet jedoch nicht, dass nicht auch andere Messstellen und Messsysteme für die entsprechenden Messaufgaben geeignet wären. Bei der Positionierung und Auswahl der Messsysteme ist speziell auf den Bau und Betrieb eines Prototyps geachtet worden. Geeignete Systeme für den Prototyp und dessen Forschungsbetrieb können für den späteren Serienprozess ungeeignet oder nicht sinnvoll sein. Eine Reevaluierung ist zu gegebener Zeit jedenfalls empfohlen und kann diese Arbeit als Ausgangspunkt verwenden.

In Abbildung 36 ist das finale Prozesslayout des SETE-Prozesses inklusive der dafür vorgeschlagenen Messtechnik dargestellt. Je Prozesspunkt sind die jeweiligen Messsysteme in Form von Transmittersymbolen dargestellt. Dabei steht TT für ein Temperaturmessgerät, PT für ein Druckmessgerät, FT für ein Durchflussmessgerät, ET für einen Energieanalytiker und LI für ein Füllstandsmessgerät. Die Energieanalytiker sowie die verbaute Sensorik in den Sekundärkreisläufen 1-3 entspricht dem Baustandard der Wien Energie und sind in Kapitel 5.4 angeführt.

6 Zusammenfassender Messkonzeptvorschlag

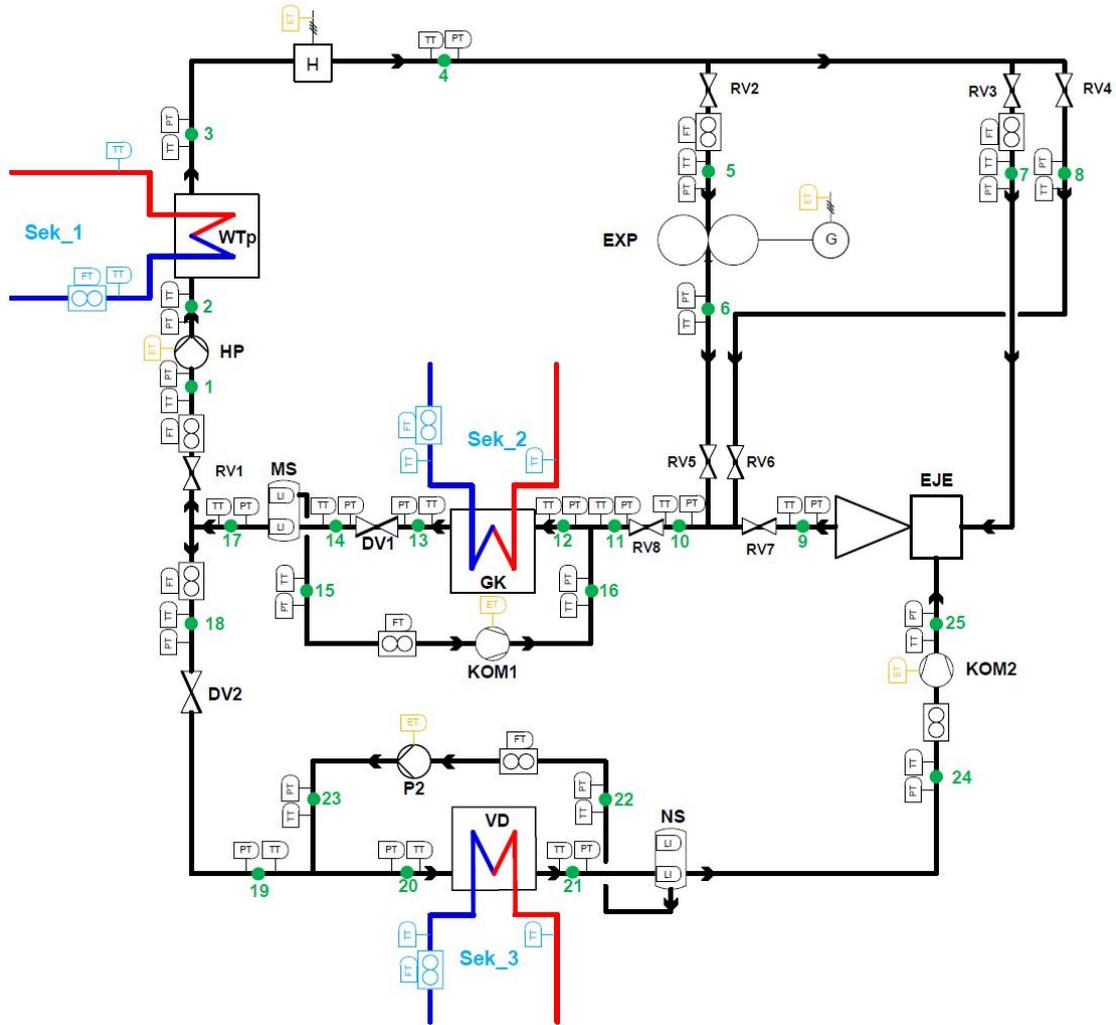


Abbildung 36: Messkonzeptvorschlag für den SETE-Prozess

Die in Abbildung 36 dargestellten Messsysteme sind zusammenfassend in den Tabellen 51 und 52 aufgelistet. Wichtig ist, dass hierbei teilweise nur die eigentlichen Sensoren angeführt sind. Etwaige weitere notwendige Messkomponenten oder Systemtrennungen sind den jeweiligen Kapiteln zu entnehmen. Die in Abbildung 36 dargestellten und für die Bildung einer einfachen Energiebilanz notwendigen Energieanalytoren sind in den beiden Tabellen nicht angeführt und Kapitel 5.4.2 zu entnehmen. Für nähere Informationen zu den Messstellen und den Anforderungen an die Messung, siehe Kapitel 5.2. Für detaillierte Beschreibungen des Messsystems siehe Kapitel 5.3.

6 Zusammenfassender Messkonzeptvorschlag

Tabelle 51: Messkonzeptvorschlag für den SETE-Prozess - Teil 1

PP	Verbaute Messsysteme
1	PT100 Schichtwiderstand - Genauigkeitsklasse B - Zweileiter-Messschaltung Drucktransmitter PT5501 PT-250-SEG14-A ZVG/US Micro Motion F-Serie Coriolis Messsystem F100S
2	PT100 Schichtwiderstand - Genauigkeitsklasse B - Zweileiter-Messschaltung Drucktransmitter PT5501 PT-250-SEG14-A ZVG/US
3	PT100 Schichtwiderstand - Genauigkeitsklasse A - Vierleiter-Messschaltung Drucktransmitter PT5501 PT-250-SEG14-A ZVG/US
4	PT100 Schichtwiderstand - Genauigkeitsklasse A - Vierleiter-Messschaltung Drucktransmitter PT5501 PT-250-SEG14-A ZVG/US
5	PT100 Schichtwiderstand - Genauigkeitsklasse B - Zweileiter-Messschaltung Drucktransmitter PT5501 PT-250-SEG14-A ZVG/US Micro Motion ELITE Coriolis Messsystem CMFS100P
6	PT100 Schichtwiderstand - Genauigkeitsklasse B - Zweileiter-Messschaltung Drucktransmitter PT5501 PT-250-SEG14-A ZVG/US
7	PT100 Schichtwiderstand - Genauigkeitsklasse A - Vierleiter-Messschaltung Drucktransmitter PT5501 PT-250-SEG14-A ZVG/US Micro Motion ELITE Coriolis Messsystem CMFS100P
8	PT100 Schichtwiderstand - Genauigkeitsklasse B - Zweileiter-Messschaltung Drucktransmitter PT5501 PT-250-SEG14-A ZVG/US
9	PT100 Schichtwiderstand - Genauigkeitsklasse A - Vierleiter-Messschaltung Drucktransmitter PT5501 PT-250-SEG14-A ZVG/US
10	PT100 Schichtwiderstand - Genauigkeitsklasse B - Zweileiter-Messschaltung Drucktransmitter PT5501 PT-250-SEG14-A ZVG/US
11	PT100 Schichtwiderstand - Genauigkeitsklasse B - Zweileiter-Messschaltung Drucktransmitter PT5501 PT-250-SEG14-A ZVG/US
12	PT1000 drahtgewickelt - Genauigkeitsklasse AA - Vierleiter-Messschaltung Präzisions-Drucksensor SD-36/37
13	PT1000 drahtgewickelt - Genauigkeitsklasse AA - Vierleiter-Messschaltung Präzisions-Drucksensor SD-36/37
14	PT1000 drahtgewickelt - Genauigkeitsklasse AA - Vierleiter-Messschaltung Präzisions-Drucksensor SD-36/37
15	PT100 Schichtwiderstand - Genauigkeitsklasse B - Zweileiter-Messschaltung Drucktransmitter PT5501 PT-250-SEG14-A ZVG/US Micro Motion F-Serie Coriolis Messsystem F025S

6 Zusammenfassender Messkonzeptvorschlag

Tabelle 52: Messkonzeptvorschlag für den SETE-Prozess - Teil 2

PP	Verbaute Messsysteme
16	PT100 Schichtwiderstand - Genauigkeitsklasse B - Zweileiter-Messschaltung Drucktransmitter PT5501 PT-250-SEG14-A ZVG/US
17	PT100 Schichtwiderstand - Genauigkeitsklasse B - Zweileiter-Messschaltung Drucktransmitter PT5501 PT-250-SEG14-A ZVG/US
18	PT100 Schichtwiderstand - Genauigkeitsklasse A - Vierleiter-Messschaltung Drucktransmitter PT5501 PT-250-SEG14-A ZVG/US Micro Motion F-Serie Coriolis Messsystem F025S
19	PT100 Schichtwiderstand - Genauigkeitsklasse B - Zweileiter-Messschaltung Drucktransmitter PT5501 PT-250-SEG14-A ZVG/US
20	PT100 Schichtwiderstand - Genauigkeitsklasse A - Vierleiter-Messschaltung Drucktransmitter PT5501 PT-250-SEG14-A ZVG/US
21	PT100 Schichtwiderstand - Genauigkeitsklasse A - Vierleiter-Messschaltung Drucktransmitter PT5501 PT-250-SEG14-A ZVG/US
22	PT100 Schichtwiderstand - Genauigkeitsklasse B - Zweileiter-Messschaltung Drucktransmitter PT5501 PT-250-SEG14-A ZVG/US Micro Motion ELITE Coriolis Messsystem CMFS015M
23	PT100 Schichtwiderstand - Genauigkeitsklasse B - Zweileiter-Messschaltung Drucktransmitter PT5501 PT-250-SEG14-A ZVG/US
24	PT100 Schichtwiderstand - Genauigkeitsklasse B - Zweileiter-Messschaltung Drucktransmitter PT5501 PT-250-SEG14-A ZVG/US Micro Motion F-Serie Coriolis Messsystem F050S
25	PT100 Schichtwiderstand - Genauigkeitsklasse B - Zweileiter-Messschaltung Drucktransmitter PT5501 PT-250-SEG14-A ZVG/US
MS	2x Vibronik Liquiphant FTL50
NS	2x Vibronik Liquiphant FTL50
Sek ₁	TS 85/120/210/480 - PT100 Sharky 775 Durchflusssensor & Rechenwerk
Sek ₂	TS 85/120/210/480 - PT100 Sharky 775 Durchflusssensor & Rechenwerk
Sek ₃	TS 85/120/210/480 - PT100 WATERFLUX 3000 SCYLAR INT M

Abbildungsverzeichnis

1	Prinzipieller subkritischer Kreisprozess, vergleichlich [5]	5
2	Prinzipieller transkritischer Kreisprozess, vergleichlich [5]	6
3	Phasendiagramm CO ₂ [20]	9
4	Prinzipschaltung des patentierten SETE-Prozesses [22]	11
5	Modifizierte Verschaltung des SETE-Prozesses für die Integration des Prozesses in verschiedenen Gebieten für Use Case 1 - innerstädtische Aufstellung [25]	14
6	Modifizierte Verschaltung des SETE-Prozesses für die Integration des Pro- zesses in verschiedenen Gebieten für Use Case 2 - städtisches Einzugsgebiet [25]	14
7	Allgemeine Struktur eines Messsystems [27]	18
8	Klassische Automatisierungspyramide nach Siepmann [31]	23
9	Aufbau eines ummantelten PT100 Messwiderstandes und Schema einer Vierleiter-Messschaltung [37]	27
10	Schematische Darstellung eines Thermopaares [30]	28
11	Grundwertdiagramm für Thermopaare nach EN 60584 [35][42]	29
12	Prinziphafte Darstellung einer Plattenfedermembran mit an der Oberfläche angebrachten DMS[38]	32
13	Prinzipielle Darstellung des Aufbaus eines Drucksensors mit kapazitivem Abgriffsystem [34]	34
14	Ultraschall-Durchflussmessung nach dem Laufzeitverfahren [30]	37
15	Beispielhafte Darstellung der bei der Coriolis-Massedurchflussmessung auftretenden Verformung des Messrohres [30]	39
16	Verschiedene Montagepositionen für Vibrationsgrenzschalter in Flüssig- keitsbehälter: Leerlauf- und Überfüllsicherung links; vertikaler Grenzstand- melder rechts [38]	41
17	Grundstruktur des Regelkreises [46]	43
18	Schematische Darstellung des finalen Prozessaufbaus mit den Hauptkom- ponenten	45
19	Betriebsmodus 1: EXP aktiv & EJE inaktiv & BYP inaktiv	48
20	Betriebsmodus 2: EXP inaktiv & EJE aktiv & BYP inaktiv	49
21	Betriebsmodus 4: Anfahrbetrieb - EXP & EJE inaktiv & BYP aktiv	50
22	Prozesspunkte des finalen Layouts des SETE 2 - Prozesses	54
23	Detailansicht Prozesspunkte 1 und 18	55
24	Detailansicht Prozesspunkte 15 und 22	57
25	Detailansicht Prozesspunkte 5, 7 und 8	58
26	Detailansicht Prozesspunkt 24	60
27	Micro Motion Messsysteme der F-Serie [61]	73

Abbildungsverzeichnis

28	Micro Motion Messsysteme der ELITE-Serie [63]	77
29	Einschraubwiderstandsthermometer von JUMO [67]	83
30	Drucktransmitter PT5501 von ifm [70]	85
31	Präzisions-Drucksensor von SUCHY [71]	87
32	Vibronik Liquiphant FTL50 von Endress+Hauser [72]	88
33	Einfache Energiebilanz des SETE-Prozesses	90
34	Beispielhafter Aufbau der Energiemengenzählung in einem Sekundärkreislauf	91
35	Energieanalysator WM30 von CARLO GAVAZZI [74]	93
36	Messkonzeptvorschlag für den SETE-Prozess	95

Tabellenverzeichnis

1	Legende zu Abbildung 4	12
2	Genauigkeitsklassen für Widerstandsthermometer nach ÖNORM EN 60751 [40]	26
3	Legende zur Abbildung 18	45
4	Primäre Regelgrößen verwandter Prozesse	52
5	Primäre Stellgrößen verwandter Prozesse	52
6	Legende zur Abbildung 22	55
7	Temperaturen und Drücke der Prozesspunkte 1 und 18	56
8	Durchflüsse und Phasenzustände der Prozesspunkte 1 und 18	57
9	Temperaturen und Drücke der Prozesspunkte 15 und 22	58
10	Durchflüsse und Phasenzustände der Prozesspunkte 15 und 22	58
11	Temperaturen und Drücke der Prozesspunkte 5 und 7	59
12	Durchflüsse und Phasenzustände der Prozesspunkte 5 und 7	59
13	Temperaturen und Drücke des Prozesspunktes 24	60
14	Durchflüsse und Phasenzustand des Prozesspunktes 24	61
15	Temperaturen und Drücke sämtlicher Prozesspunkte	62
16	Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 1	62
17	Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 2	63
18	Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 3	63
19	Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 4	63
20	Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 5	64
21	Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 6	64
22	Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 7	64
23	Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 8	65
24	Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 9	65
25	Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 10	65
26	Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 11	66
27	Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 12	66
28	Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 13	66
29	Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 14	67
30	Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 15	67

Tabellenverzeichnis

31	Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 16	67
32	Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 17	68
33	Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 18	68
34	Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 19	68
35	Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 20	69
36	Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 21	69
37	Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 22	69
38	Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 23	69
39	Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 24	70
40	Nutzen und Anforderungsgrad der Temperatur- und Druckmessung im PP 25	70
41	Temperaturen und Drücke in den beiden Sammlern (MS & NS)	71
42	Allgemeine Arbeitsbereiche und Messabweichungen beider Messgeräte Micro Motion Type F100S und F025S bei der Messung von Flüssigkeiten [61]	74
43	Spezifische Arbeitsbereiche und Messabweichungen der Messgeräte Micro Motion Type F100S und F025S bei der Messung von Flüssigkeiten [61]	74
44	Spezifische Arbeitsbereiche und Messabweichungen des Messgerätes Micro Motion Type F025S bei der Messung von Gasen [61]	75
45	Spezifische Arbeitsbereiche und Messabweichungen des Messgerätes Micro Motion ELITE Type CMFS015M bei der Messung von Flüssigkeiten [63]	77
46	Spezifische Arbeitsbereiche und Messabweichungen des Messgerätes Micro Motion ELITE Type CMFS100P bei der Messung von Gasen [63]	79
47	Spezifische Arbeitsbereiche und Messabweichungen des Messgerätes Micro Motion Type F050S bei der Messung von Gasen [61]	81
48	Arbeitsbereiche und Messabweichungen des Vibronik Liquiphant FTL50 Grenzstanddetektors	88
49	Relevante physikalische Größen der Sekundärkreisläufe	91
50	Ausgewählte Messsensorik für die Energiemengenzählung in den drei Sekundärkreisen	92
51	Messkonzeptvorschlag für den SETE-Prozess - Teil 1	96
52	Messkonzeptvorschlag für den SETE-Prozess - Teil 2	97

Literaturverzeichnis

- [1] P. NOERES. *Thermische Kälteerzeugung mit Dampfstrahlkältemaschinen - Konzepte und Erfahrung*. KI Luft- und Kältetechnik, 2006. Vortrag, gehalten beim DKV-Bezirksverein in Berlin.
- [2] T. RIEDER. Dekarbonisierung Wiens 2040. Homepage der Wien Energie GmbH; Stand: 22.09.2023.
<https://positionen.wienenergie.at/studien/decarb-studie/>
- [3] DANFOSS. Kältetechnik - Einführung in die Grundlagen, 2007. Ausbildungsunterlagen Danfoss, DKRCC.PF.000.2.03 / 520H1507.
- [4] L. WINDER. *Aufbau und Inbetriebnahme einer R744 - Kälteanlage mit Wärmepumpenfunktion für den Schienenverkehr*. Masterarbeit, Technische Universität Graz, 2019.
- [5] J. SÜSS, B. D. RASMUSSEN. *Komponenten für transkritische CO₂-Anlagen kleiner Leistung*. KI Luft- und Kältetechnik, 2004.
- [6] P. HAIDMEIER. *Sicherheitsrelevante Planung einer CO₂ Testanlage*. Masterarbeit, Technische Universität Wien, Institut für Energietechnik und Thermodynamik, 2021.
- [7] D. PACZONA. *Simulation und Vermessung einer R744 - Kompressionskälteanlage/Wärmepumpe für Kraftfahrzeuge*. Masterarbeit, Karl Franzens Universität Graz, Institut für theoretische Physik, 2018 .
- [8] WIKIBRIEF. Transkritischer Zyklus. Homepage von Wikibrief; Stand: 22.08.2023.
https://de.wikibrief.org/wiki/Transcritical_cycle
- [9] G. DILGER. Lexikon der Geothermie - Überkritisch. Homepage vom Bundesverband Geothermie; Stand: 21.08.2023.
<https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/>
- [10] N. CONNOR. Was ist der kritische Punkt des Wassers - Definition. 2019; Homepage von Thermal Engineering; Stand: 21.08.2023.
<https://www.thermal-engineering.org/de/>
- [11] AREACOOING. Kältemittel - Allgemeine Informationen. Informationsplattform areacademy - Homepage von Area Cooling Solutions; Stand: 22.08.2023.
areacooling.com/areacademy/de/kaltemittel-allgemeine-informationen/
- [12] J. DOHMANN. *Thermodynamik der Kälteanlagen und Wärmepumpen - Grundlagen und Anwendungen der Kältetechnik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2016.
doi:10.1007/978-3-662-49110-2

Literaturverzeichnis

- [13] A. SCHRÖDER. *Analyse einer industriellen CO₂-Kälteanlage mit Ejektor*. Doktorarbeit, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Fakultät für Maschinenbau, 2020 .
- [14] EUROPÄISCHES PARLAMENT, RAT DER EUROPÄISCHEN UNION. Verordnung (EU) Nr. 517/2014 über fluorierte Treibhausgase ... Verordnung COD 2012/0305, KOM 2012/0643; Inkraftgetreten am 01.01.2015.
- [15] A. FUHRMANN. Die F-Gase-Verordnung und die Anforderungen für Betreiber. Seite Expertenwissen - Homepage von infraserv Höchst; Stand: 22.08.2023.
<https://www.infraserv.com/>
- [16] A. HAFNER, K. BANASIAK. *R744 ejector technology future perspectives*. paper in Journal of Physics: Conference Series 745 032157, 2016.
doi:10.1088/1724-6596/745/3/032157
- [17] N. BRANDT. *Erforschung einer Einheit aus Ejektor, Verdampfer und Seperator zur Effizienzsteigerung von CO₂-Wärmepumpenwäschetrockner*. TU Braunschweig, Institut für Thermodynamik. Abschlussbericht, Deutsche Bundesstiftung Umwelt AZ: 33816/01, 2021.
- [18] J. SARKAR. *Transcritical carbon dioxide based heat pumps for simultaneous cooling and heating applications*. Doktorarbeit, Indian Institut of Technology, Kharagpur, 2005.
doi:10.13140/RG.2.1.4089.0727
- [19] K. KOSOWSKI, W. TEGETHOFF, J. KÖHLER. *Wärmeversorgungssystem mit CO₂-Wärmepumpe*. TU Braunschweig, Institut für Thermodynamik. Abschlussbericht, AZ: 20866.
- [20] S. J. DÜCKER. Anorganische Chemie - Phasendiagramme reiner Stoffe. Homepage von ingenieurkurse.de, Stand: 21.08.2023.
<https://www.ingenieurkurse.de/>
- [21] S. RIPPERGER, K. NIKOLAUS. *Entwicklung und Planung verfahrenstechnischer Anlagen*. Springer-Verlag GmbH Deutschland, 2020.
doi:10.1007/978-3-662-60427-4
- [22] R. KROTIL, C. PINTER. Verfahren und Anlage zur gekoppelten solarthermischen Strom-, Wärme- und Kälteerzeugung. (AT 507 218 B1) Österreichisches Patentamt, Stand: 06.03.2023.
<https://see-ip.patentamt.at/Publication/PdfDocument/?DocumentId=8b369602-fcb6-41ac-a8fe-16821cd8528d>
- [23] ÖSTERREICHISCHES PATENTAMT. Datenbank SEE.IP des österreichischen Patentamtes. Stand: 06.03.2023.
<https://see-ip.patentamt.at/NPatentSuche>
- [24] R. KROTIL, C. PINTER. *Solare elektrische und thermische Energiebereitstellung "SETE-Prozess"*. 15. Symposium Energieinnovation, TU Graz, 2018.
doi:10.3217/978-3-85125-586-7

Literaturverzeichnis

- [25] G. GEISEGGER. *SETE - Dezentral alles aus einer Hand*. Endbericht, WSTW Innovationsfonds - Wien Energie, 2021.
- [26] R. PARTHIER. *Messtechnik - Grundlagen und Anwendungen der elektrischen Messtechnik*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 8. Auflage, 2016.
doi:10.1007/978-3-658-13598-0
- [27] F. P. LEON. *Messtechnik - Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. Springer-Verlag GmbH Deutschland, 11. Auflage, 2019.
doi:10.1007/978-3-662-59767-5
- [28] M. RUDOLPH, U. WAGNER. *Energieanwendungstechnik - Wege und Techniken zur effizienteren Energienutzung*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
doi:10.1007/978-3-540-79022-8
- [29] K. SATTLER, W. KASPER. *Verfahrenstechnische Anlagen - Planung, Bau und Betrieb*. WILEY-VCH Verlag GmbH, 2000. Titeldatensatz der Deutschen Bibliothek 3-527-28459-1.
- [30] H.-J. GEVATTER, U. GRÜNHAUPT. *Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2. Auflage, 2006. ISBN-13 978-3-540-21207-2 Berlin Heidelberg New York.
- [31] T. MEUDT, M. POHL, J. METTERNICH. *Die Automatisierungspyramide - Ein Literaturüberblick*, 2017. Technische Universität Darmstadt.
- [32] M. OLEJNIK. Homepage von Meister Automation GmbH. Stand: 16.06.2023.
<https://www.meister-automation.de/feldebene/>
- [33] TE CONNECTIVITY. Messumformer und Transmitter. Homepage von TE Connectivity Corporation; Stand: 11.07.2023.
<https://www.te.com/deu-de/products/sensors/pressure-sensors/pressure-transducers.html?tab=pgp-story>
- [34] G. LÜTKEPOHL, K.-H. SCHACK, W. SCHUKA, D. FLACH. *Industrielle Druck-Messtechnik; Grundlagen und Praxis*, 2012. ABB Automation Products GmbH.
- [35] ABB AUTOMATION PRODUCTS GMBH. *Industrielle Temperatur-Messtechnik; Grundlagen und Praxis*, 2013.
- [36] W. NITSCHKE, A. BRUNN. *Strömungsmesstechnik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2. Auflage, 2006. ISBN-13 978-3-540-20990-4.
- [37] P. v. BÖCKH, C. SAUMWEBER. *Fluidmechanik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 3. Auflage, 2013.
doi:10.1007/978-3-642-33892-2
- [38] H.-R. TRÄNKLER, L.M. REINDL. *Sensortechnik - Handbuch für Praxis und Wissenschaft*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2. Auflage, 2018.
doi:10.1007/978-3-642-29942-1

Literaturverzeichnis

- [39] D. LINGENHÖHL. Debye-Temperatur. Homepage von Spektrum.de; Stand: 26.06.2023.
<https://www.spektrum.de/lexikon/physik/debye-temperatur/2809>
- [40] ÖNORM EN 60751:2008. Industrielle Platin-Widerstandsthermometer und Platin-Temperatursensoren. Austrian Standards Institute; Ausgabe: 2009-06-01.
- [41] K. KULTERER, D. PRESCH, M. HOFMANN, M. MITTERNDORFER. *Messleitfaden II - Leitfaden zur Messtechnik*. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2015. Klimaaktiv.
- [42] ÖNORM EN 60584-1:2014. Thermoelemente; Teil 1: Thermospannungen und Grenabweichungen. Austrian Standards Institute; Ausgabe: 2014-09-01.
- [43] F. FRENZEL, H. GROETHEY, C. HABERSETZER, M. HIATT, ET.AL. *Industrielle Durchfluss-Messtechnik - Grundlagen und Praxis*. ABB Automation Products GmbH, 2011.
- [44] CAPTRON REDAKTION. Füllstandsmessung: Welche Methode eignet sich am Besten für mein Medium? Homepage von CAPTRON; Stand: 31.12.2023.
<https://www.captron.de/blog/>
- [45] H. KUCHLING. *Taschenbuch der Physik*. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 21. Auflage, 2014. ISBN 978-3-446-44218-4.
- [46] J. LUNZE. *Regelungstechnik 1*. Springer-Verlag GmbH Deutschland, 12. Auflage, 2020.
doi:10.1007/978-3-662-60746-6
- [47] B. HEINRICH. *Grundlagen Regelungstechnik*. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 6. Auflage, 2021.
doi:10.1007/978-3-658-34420-7
- [48] W. SCHNEIDER. *Praktische Regelungstechnik*. Wieweg + Teubner, 3. Auflage, 2008. ISBN 978-3-528-24662-4.
- [49] A. VARCHIM. *Regelungstechnische Analyse von Kälteanlage mit parallelen Verdampfern*. Masterarbeit, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2018.
- [50] M. GRAEBER. *Energieoptimale Regelung von Kälteprozessen*. Doktorarbeit, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2013.
- [51] M. NÖDING. *Energieoptimierte Regelung von CO₂-Kompressionskältekreisläufen*. Doktorarbeit, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2019.
- [52] J. B. JENSEN, S. SKOGESTAD. *Optimal operation of simple refrigeration cycles Part I: Degrees of freedom and optimality of sub-cooling*. Elsevier - Computers and Chemical Engineering 31, Norwegian University of Science and Technology, 2007.
doi:10.1016/j.compchemeng.2006.12.003

- [53] M. NOEDING, W. TEGETHOFF, J. KOEHLER. *Decoupling Control for Sub- and Transcritical Operation of CO₂ Refrigeration Cycles*. IEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA), 2018. 978-1-5386-7698-1/18.
- [54] G. TOSATO, P. ARTUSO, S. MINETTO, A. ROSSETTI, Y. ALLOUCHE, K. BANASIAK. *Experimental and numerical investigation of a transcritical CO₂ air/water reversible heat pump: analysis of domestic hot water production*. 14th Gustav Lorentzen Conference, 2020.
doi:10.18462/iir.gl.2020.1160
- [55] T. JANI. Lambda Geeks - So berechnen Sie die Überhitzung: Prozess, Formel, Arbeit, Beispiel. Stand: 01.12.2023.
<https://de.lambdageeks.com/how-to-calculate-superheat/>
- [56] S. ELBEL, N. LAWRENCE. *Review of recent developments in advanced ejector technology*. Elsevir - International Journal of Refrigeration 62 1-18, 2015.
doi:10.1016/j.ijrefrig.2015.10.031
- [57] V. ILLYES, S. THANHEISER, P. SCHWARZMAYR, P. DAVID, X. GUERIG, A. WERNER, M. HAIDER. *sCO₂ Test facility at TU Wien: design, operation and results*. The 5th sCO₂ Conference for Energy Systems, 2023.
doi:10.17185/dupublico/77261
- [58] C. SCHLEMMINGER, K. BJORGEN, S. FOSLIE, Y. ALLOUCHE, A. HAFNER. *Field measurements of integrated MultiPACK supermarkets*. 6th IIR Conference on Sustainability and the Cold Chain, 20.
doi:0.18462/irr.iccc.2020.293768
- [59] S.M. LIAO, T.S. ZHAO. *Measurements of Heat Transfer Coefficients From Supercritical Carbon Dioxide Flowing in Horizontal Mini/Micro Channels*. Journal of Heat Transfer, ASME, Vol. 124, 2002.
doi:10.1115/1.1423906
- [60] R. B. BARTA, P. E. BECK, D. ZIVIANI, E. A. GROLL. *Experimental Comparison of Cycle Modifications to a Multi-Stage Two-Evaporator Transcritical CO₂ Refrigeration Cycle*. 18th International Refrigeration and Air Conditioning Conference, 2021. Purdue University.
- [61] EMERSON. Micro Motion Messsysteme der F-Serie für Durchfluss und Dichte. Produktdatenblatt PS-00606, Rev AJ, Mai 2022; Stand: 09.01.2024.
<https://www.emerson.com/documents/automation/produktdatenblatt-micro-motion-messsysteme-der-f-serie-f%C3%BCr-durchfluss-und-dichte-de-64814.pdf>
- [62] B. WISCHNEWSKI. Berechnung der thermodynamischen Zustandsgrößen von Kohlendioxid, 2007. Berechnungstool peace software Berlin.
<https://www.peacesoftware.de/einigewerte/co2.html>
- [63] EMERSON. Micro Motion ELITE Coriolis-Messsysteme für Durchfluss und Dichte. Produktdatenblatt PS-00447, Rev AM, August 2021; Stand: 09.01.2024.
<https://www.emerson.com/de-at/automation/measurement-instrumentation/micro-motion/micro-motion-elite-coriolis-flow-meters>

- [64] H. H. PARK, J. E. CHA. *Measurements of the flow of supercritical pressure carbon dioxide through Venturi flow meter*. Elsevir - Flow Measurement and Instrumentation 91, 2023.
doi:10.1016/j.flowmeasinst.2023.102364
- [65] EMERSON. Micro Motion ELITE Coriolis Flow and Density Meters. Technical Data Sheet PS-001773, Rev I, August 2019; Stand: 06.02.2024.
<https://www.emerson.com/de-at/automation/measurement-instrumentation/micro-motion/micro-motion-elite-coriolis-flow-meters>
- [66] JUMO. Einschraub- und Einschweiß-Schutzhülsen. Typenblatt 909710; 2022; Stand: 06.02.2024.
<https://www.jumo.at/web/products/apps/productdetailpage?pdpId=909710>
- [67] JUMO. Einschraubwiderstandsthermometer mit Anschlusskopf Form B. Typenblatt 902020; 2021; Stand: 06.02.2024.
<https://www.jumo.at/web/products/apps/productdetailpage?pdpId=902020>
- [68] R. SACHS. Pt100, Pt1000 oder NTC - welcher Sensor ist der Richtige? Beitrag in WIKA-Blog; Stand: 06.02.2024.
<https://blog.wika.de/know-how/>
- [69] IFM ELECTRONIC GMBH. Wassersackrohr SIPHON TUBE G1/2. Typenblatt E30141-00; 2014; Stand: 09.02.2024.
<https://www.ifm.com/at/de/product/E30141>
- [70] IFM ELECTRONIC GMBH. Drucktransmitter PT5501 PT-250-SEG14-A-ZVG-US. Typenblatt PT5501-01; 2023; Stand: 04.12.2023.
<https://www.ifm.com/at/de/product/PT5501>
- [71] SUCHY MESSTECHNIK. Präzisions-Drucksensor mit innenliegender Membran aus Edelstahl. Datenblatt SD 360; 2020; Stand: 09.02.2024.
<https://shop.suchy-messtechnik.de/c/druckmesstechnik/praezisionsdrucksensoren/p/SD-37>
- [72] ENDRESS+HAUSER GMBH. Datenblatt Vibronik Grenzstanddetektion Liquiphant FTL 50. Stand: 09.01.2024.
<https://www.at.endress.com/de/messgeraete-fuer-die-prozesstechnik/fuellstandssensor/Vibronik-Liquiphant-FTL50?t.tabId=product-overview>
- [73] ENDRESS+HAUSER GMBH ÖSTERREICH. Technische Information: Liquiphant M FTL50, FTL51, FTL50H, FTL51H. Stand: 09.01.2024.
<https://www.at.endress.com/de/messgeraete-fuer-die-prozesstechnik/fuellstandssensor/Vibronik-Liquiphant-FTL50?t.tabId=product-overview>
- [74] CARLO GAVAZZI CONTROLS SPA. WM30 Energieanalysator für Dreiphasensysteme. Produktdatenblatt 28/04/2022 WM30 DS DEU; Stand: 22.01.2024.
https://www.gavazziautomation.com/images/PIM/DATASHEET/DEU/WM30_DS_DEU.pdf